MÄRZ 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT



Serie: 100 Jahre Relativitätstheorie

www.spektrum.de

TREIBHAUSEFFEKT

Kippt das Klima?

Die globale Erwärmung könnte innerhalb weniger Jahre in eine neue Kaltzeit umschlagen

SPEZIAL COMPUTER

Supercomputer – quo vadis?

ASTROPHYSIK

Kosmos in der Midlife-Crisis

ZWERGMENSCH

Neue Menschenart auf Flores entdeckt?



Homo sapiens *Homo floresiensis*

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €
03
4 194058 406900



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Durchbrüche, Einbrüche, Aufbrüche

Einstein allerorten: Wie immer, wenn die größte Ikone der modernen Naturwissenschaft einen Jahrestag begeht, sind die Medien voll – auch Spektrum! Unsere Einstein-Biografie ist seit Februar aktualisiert auf dem Markt, und am 6. März gelangt unser neues Spektrum-Spezial an die Kioske, in dem wir diesmal »Einstein und die Folgen« würdigen. In dem Spezial geht es um: die Durchbrüche des Theoretischen Physikers aus dem Jahr 1905 ebenso wie die Auswirkungen von Einsteins brillanten Theorien auf die Gegenwart. Mit dieser Ausgabe beginnt zugleich eine vierteilige Serie von Interviews mit prominenten Wissenschaftlern zu einzelnen Themen, zu denen Einstein einst grundlegende Anstöße lieferte.





Was viele neben der unmittelbaren Bewältigung der Tsunami-Flutkatastrophe am meisten beschäftigt, ist die Frage nach einer zuverlässigen Vorhersage des nächsten solchen Großereignisses. Denn eines ist sicher: Viele Menschen hätten bei einer Warnung vor der Flutwelle gerettet werden können. Ein Tsunami-Frühwarnsystem rund um den Indischen Ozean herum soll – nach dem existierenden Modell für den Pazifik – jetzt installiert werden, unter anderem mit deutscher Hilfe. Dieses System kann natürlich erst nach einem Beben Alarm schlagen. Doch mit einer direkten und kurzfristigen Vorhersage von großen Erdbeben sieht es weiterhin schlecht aus. Vor allem eine halbwegs zuverlässige Warnung für einen Zeitraum von Tagen oder Wochen halten Seismologen für ziemlich aussichtslos. Realistischer sind dagegen Langzeit-Vorhersagen. Sie betreffen die Wahrscheinlichkeit künftiger Beben innerhalb von Monaten oder Jahren.

Das ist nicht so wenig, wie es auf den ersten Blick klingt. Erdbeben treten bevorzugt in so genannten Störungszonen auf. Als Vorsorge könnte es schon zur Pflicht gemacht werden, in diesen Gebieten die Gebäude erdbebensicher zu gestalten. Leider sind bisher noch nicht alle Störungszonen der Erdkruste bekannt. So kommt es zum einen immer wieder zu Überraschungen, wie etwa am 23. Oktober 2004: Da kostete ein Beben der Stärke 6,8 vor Japans Küste 27 Todesopfer. Sein Epizentrum lag in einer bis dahin seismologisch unauffälligen Region. Zum anderen aber macht inzwischen auch die Bebenmodellierung deutliche Fortschritte, vor allem weil sie sich auf relevante aktuelle Daten stützen kann. Diese werden inzwischen von Satelliten geliefert, die etwa die Kontaktzonen der Pazifischen Platte mit benachbarten Kontinentalplatten exakt vermessen, und durch laufende Beobachtungen großräumiger Deformationen der Erdkruste ergänzt.

Über andere, akute Frühwarnindikatoren wird gerne spekuliert, gerade wenn etwa Tiere sich instinktsicher rechtzeitig von bedrohten Küsten zurückgezogen haben sollen. Seit 2003 immerhin sucht das »Global Earthquake Satellite System« der Nasa den Planeten nach Lichterscheinungen und Wärmeanomalien ab, die durch Druckwellen im Gestein und veränderte elektrische Felder auftreten könnten. Das See- und Erdbeben vom 26. Dezember haben sie leider nicht bemerkt. Unser Planet bleibt unberechenbar.

INHALT

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Das irdische Klimasystem im plötzlichen Umschwung: Vom Treibhaus wird der Globus dann zum Beispiel zum Eiskeller – und umgekehrt
Titelbild: Slim Films

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

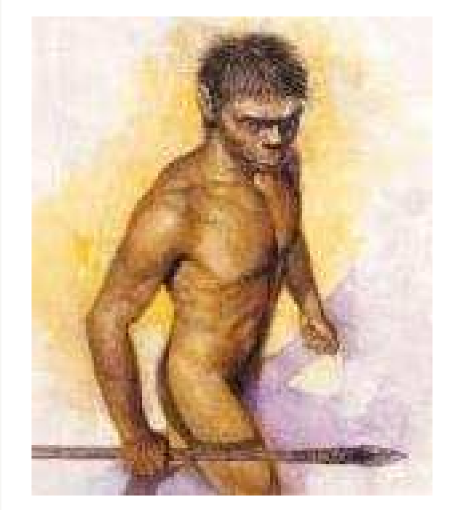
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 26

EINSTEIN-JAHR 2005

Ein patenter Experte

Im April jährt sich der Todestag Albert Einsteins zum 50. Mal. Und im »Wunderjahr« 1905 begründeten mehrere bahnbrechende Arbeiten den Ruhm des bekanntesten Physikers des 20. Jahrhunderts



SEITE 30

MENSCHENEVOLUTION

Der Zwergmensch von Flores

Auf der indonesischen Insel entdeckten Forscher kürzlich Knochen von nur einen Meter großen Menschen. Sie vermuten, dass sie als eigene Menschenart noch lange zeitgleich mit dem *Homo sapiens* existierten



ASTROPHYSIK SEITE 50

Die Midlife-Crisis des Kosmos

Die Zeit ungestümer Aktivität im Universum ist vorbei – doch noch immer entstehen Sterne und Schwarze Löcher in erstaunlicher Menge



SEITE 62

GENOMIK

Das verkannte Genom-Programm

Im vermeintlichen DNA-Schrott verbirgt sich ein Regulationssystem, das sich statt auf Proteine auf RNA stützt. Beruht darauf die Komplexität höherer Organismen?



TITELTHEMA SEITE 42

Klimasprünge

Um zehn Grad fallende Wintertemperaturen und plötzliche Dürren in vielen Teilen der Welt sind nicht nur Stoff für Katastrophenfilme. Solche unerwarteten Klimaumschwünge hat es in der Erdgeschichte immer wieder gegeben

SEITE 70

RAUBGRABUNGEN IM IRAK

Die Vernichtung der Vergangenheit

Die archäologischen Stätten Mesopotamiens sind weiterhin Ziel systematischer Raubgrabungen. Der Antikenhandel profitiert davon



SCHWERPUNKT: Computer der Zukunft

SEITE 84

Nach wie vor werden die Rechner in rasantem Tempo kleiner und schneller. Licht hilft den Elektronen, die nicht mehr mithalten können, auf die Sprünge. Mehrere Rechenwerke auf einem Mikrochip bringen eine weitere Temposteigerung

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

JUNGE WISSENSCHAFT

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Die verfilmte Relativität

Ein Lehrfilm über die Relativitätstheorie entwickelte sich 1922 zum Kassenschlager – und bot den Einsteingegnern willkommenen Anlass zur Polemik

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Dunkle Energie im Labor

Forschung aktuell
November 2004

Dieser Artikel ist zwar gut geschrieben und basiert auf einem Preprint von Beck und Mackey. Leider ist deren Argument aber falsch, und somit kann man die Dunkle Energie nicht mit dem Josephson-Effekt nachweisen.

Ich habe zusammen mit Norbert Straumann eine Stellungnahme verfasst und auf das Web gestellt (astro-ph/0411034).

Philippe Jetzer, Zürich

Ist das Weltall ein Computer?

Januar 2005

Input (k)ein Problem

Die Aussage auf S. 36 »Der Input ist kein Problem« trifft für das zuvor erwähnte, ein Kilogramm schwere Schwarze Loch sicherlich nicht zu. Da das Schwarze Loch nach nur 10^{-21} Sekunden explodiert, dürfte sich die einstürzende Materie in maximal 10^{-12} Meter Entfernung befinden, um den Ereignishorizont noch vor der Explosion zu erreichen – rund einem Hundertstel eines Atomdurchmessers. Außerdem würde jede Form von Materie durch die extrem hohen Gezeitenkräfte lange vorher zerstört. Daher wird höchstens ein winziger Bruchteil der in der einstürzenden Materie enthaltenen Information den Ereignishorizont erreichen. In der Praxis lässt sich vermutlich nichts in ein solches Schwarzes Loch hineinwerfen, außer vielleicht einem zweiten Schwarzen Loch von ähnlicher Masse, das sich in genügend kleinem Abstand zum ersten befindet.

Große Schwarze Löcher von zum Beispiel Sonnenmasse können zwar im Prinzip große Informationsmengen verschlingen – etwa einen ganzen Stern –, lassen sich aber schier unendlich lange Zeit (10^{66} Jahre), um diese wieder preiszugeben.

Dr. Marc Eberhard, Basel

Ein Schwarzes Loch, symbolisch garniert mit Transistoren und Chips: Nach der Informationstheorie sind diese Objekte rechnende Systeme.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Möglichkeit einer experimentellen Überprüfbarkeit

Dieser Artikel hat mit meinem Verständnis von Wissenschaft nichts mehr zu tun. Dass eine seriöse Zeitung wie Spektrum der Wissenschaft ein solches Vorgehen adelt, finde ich sehr bedenklich.

Ist es mittlerweile vollständig in Vergessenheit geraten, dass zum wissenschaftlichen Arbeiten sorgfältig definierte Begrifflichkeiten gehören und zumindest am Horizont die Möglichkeit einer experimentellen Überprüfbarkeit aufblitzen sollte? Ist es tatsächlich zu viel verlangt, wenn man von einem Wissenschaftler fordert, zwischen einem Phänomen und dessen Beschreibung unterscheiden zu können? Wahrscheinlich würden die Autoren dieses Artikels solche Anforderungen als unzumutbare Beschränkung ihrer kreativen Freiheit auffassen und die ernsthafte Sichtung ihrer Ideen lieber den wissenschaftlichen Erbsenzählern überlassen, die ihren Visionen hinterherkriechen, während sie schon zu neuen Wolkenkuckucksheimen entschweben.

Ich hoffe, dass Ihre Zeitung einmal eine Denkpause einlegt und darüber reflektiert, wodurch sich eine wissenschaftliche Aussage eigentlich von einer esoterischen unterscheidet, anstatt wie in der letzten Ausgabe dem Zeitgeist hinterherzuhecheln.

Dr. Marco Wehr, Tübingen

Magnetantrieb für Raumfahrzeuge

Dezember 2004

Als Physiklehrer höre ich von meinen Schülern immer wieder, dass Objekte deswegen in einer stabilen Umlaufbahn bleiben, weil sich Zentrifugal- und Gravitationskraft gerade kompensieren. Obiger Artikel argumentiert ebenfalls mit dieser Vorstellung und zeigt die sich aufhebenden Kräfte (»Fliehkraft« und »Erdanziehung«) in einer entsprechenden Skizze. Dieses verbreitete Erklärungsmuster führt aber zu einem Dilemma: Verhielte es sich so, wäre die Summe der von außen am Objekt angreifenden Kräfte null und es müsste dem Tägheitsgesetz folgen und sich geradlinig gleichförmig bewegen, würde also niemals in eine Kreisbahn einschwenken.

Diese Konfusion entsteht dadurch, dass man die Bezugssysteme nicht auseinander hält: Fliehkräfte erlebt nur der mitbewegte Beobachter. Der außenstehende muss dagegen eine nach innen gerichtete Zentripetalkraft fordern, die das Objekt von seiner geradlinigen Bewegung abbringt und auf eine Kreisbahn zwingt. Genau das macht die Gravitationskraft. Würde diese Kraft plötzlich aufgehoben, müsste das Objekt tangential wegfliegen.

Die oben kritisierte Darstellung erklärt die Dinge vielleicht anschaulicher, letztlich führt sie aber zu einem unbefriedigenden physikalischen Widerspruch.

Horst Groß, Siegen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

So beispielsweise könnte ein elektrodynamisches Raumseilsystem aussehen.

Mathematische Unterhaltungen

Dezember 2004

Man braucht nicht unbedingt acht Quader, um ein vierdimensionales Volumen stoßsicher zu verpacken. Fünf Tetraeder tun es auch, ebenso wie in unserem dreidimensionalen Raum vier Dreiecke in Form eines Tetraeders ein Volumen umschließen.

Interessant ist die Projektion dieses Körpers (des »Fünfzells«) in den $\mathbb{R}^2$. Das Ergebnis ist ein Pentagramm, das von einem Fünfeck umschlossen ist. Damit erklärt sich auch die Beschwörung

des Teufels. Man klappt ein Tetraeder beiseite (in der Projektion: man lässt eine Kante ein Stück offen), damit er eintreten kann. Danach schließt man die Lücke, und er ist in diesem vierdimensionalen Körper gefangen.

Martin Bernhauer, Karlsruhe

Alhazen: Physik am Rande des Irrsinns

Dezember 2004

Trotz Alhazens Beschreibung der bikonvexen Linse war die Lupe bereits in der Antike bekannt. Im Lustspiel »Die Wolken« schildert der Dichter Aristophanes (423 v. Chr.) die Verwendung der Sammellinse als Brennglas. Im Vers 767 (2. Aufzug, 1. Szene) sagt Strepsiades: Hast du schon bei den Arzneimittel- und Drogenverkäufern den Stein gefunden, den schönen, den durchsichtigen, mit dem du das Feuer einfangen kannst? Sokrates antwortet: Du sprichst von dem Glas? Strepsiades: Genau das tu ich! Offensichtlich weiß Aristophanes, dass diese Linsen aus Bergkristall oder Glas sein können, was die Funde bestätigen.

Nicht jeder plankonvexe Bergkristall wurde als Lupe verwendet (der älteste stammt aus Ninive um 640 v. Chr.). Der Verkauf bei Händlern aber spricht für die große Verbreitung. Die überaus feinen Einzelheiten, oft genauer als 0,1 mm, beim Schnitt antiker Gemmen zeigen, dass die Antike zu vergrößern wusste.

Dr. Dr. Rolf C. A. Rottländer, Rottenburg

Raumschiff Enterprise startklar, alles einsteigen!

Nachgehakt, Dezember 2004

Mit einigem Befremden habe ich diesen Beitrag gelesen, in dem über den erfolgreichen Wiederflug von »Space Ship One« berichtet wurde. In einer Ausgabe, in der die diesjährigen Nobelpreisträger gewürdigt werden, hätte ich auch ein paar anerkennende Worte für eine technische Leistung erwartet, deren Realisierung immerhin mit einem Preis von mehreren Millionen Dollar dotiert war. Aber weit gefehlt!

Ohne sich auch nur im Geringsten mit technischen oder wissenschaftlichen Details aufzuhalten, wird das gesamte Projekt in einer geradezu überheblichen Art und Weise lächerlich gemacht und quasi verbal »vom Tisch gewischt«. Dass Herr Groß kein Verfechter der benannten Raumfahrt ist, ist seine Sache.

Aber wenn ein Autor einer bestimmten wissenschaftlich-technischen Leistung nichts Positives abgewinnen kann, andererseits aber auch nicht in der Lage ist, wissenschaftliche oder rationale Argumente dagegen ins Feld zu führen, sondern sich stattdessen auf fast schon billige Polemik zurückziehen muss, um seine Antipathie gegen eine bestimmte Forschungsrichtung zu dokumentieren, dann hat sein Artikel meiner Ansicht nach keine Berechtigung mehr, in einer seriösen wissenschaftlichen Zeitschrift veröffentlicht zu werden.

Dr.-Ing. Thomas Stöckle, Neckartenzlingen

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Errata:

Mythos Pest, Januar 2005

Die untere Zeile in der Bildbeschriftung auf S. 48 muss heißen: mutmaßliche Seuchenherde unter Wildtieren.

Die Tsunami-Katastrophe

Schlaglicht, Februar 2005

In der untersten Grafik auf S. 11 muss es »Wellenhöhe in Zentimetern« heißen.

Stabil in der Schwebe,

Februar 2005

Fälschlicherweise wurde der Name des deutschen Physikers Werner Braunbek mit ck geschrieben. Sein zitiertes Werk hätte heißen müssen: »Freischwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld«.

Die Größe der Allerkleinsten

Januar 2005

Nicht erst vor 3 Millionen, sondern schon vor 3 Milliarden Jahren – also lange bevor große Organismen erschienen – waren die wesentlichen biogeochemischen Kreisläufe etabliert, von denen auch unsere Existenz abhängt.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Bernhard Gerl, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Scholz, Claus-Peter Sesín

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

SPEKTROGRAMM



PLANETOLOGIE

Mond mit Gürtel

■ Als Mond mit zwei Gesichtern – die eine Hälfte ist pechschwarz, die andere schneeweiß – hat Japetus die Astronomen schon immer fasziniert. Neue Aufnahmen der Raumsonde Cassini lassen den Trabanten von Saturn nun noch rätselhafter erscheinen. Demnach zieht sich ein fast zwanzig Kilometer breiter und etwa dreizehn Kilometer hoher Wulst über eine Länge von mindestens 1300 Kilometern fast genau am Äquater entlang. Das ist umso erstaunlicher, als der Mond mit einem Durchmesser von nur 1436 Kilometern recht klein ist. Über die Ursache dieser im Sonnensystem bisher einmaligen Bauchbinde spekulieren die Planetenforscher noch. Denkbar wäre, dass durch einen riesigen Riss Gesteinsschmelze nach außen gedrungen und erstarrt ist. Alternativ könnte der Wulst durch Kompressionskräfte aufgefaltet worden sein. Beide Mechanismen erklären aber nicht so recht, warum der Gürtel absolut geradlinig ist und fast exakt dem Äquator folgt. Genaueres hoffen die Astronomen im September 2007 zu erfahren, wenn Cassini erneut an Japetus vorbeifliegen und dann hundertmal schärfere Fotos schießen wird.

(Nasa, 7.01.2005)

QUANTENPHYSIK

Atomarer Rekorder für Laserlicht

■ Einem Team von Physikern in Dänemark, Belgien und Deutschland ist es gelungen, den Polarisationszustand von Photonen eines Laserstrahls auf Atome zu übertragen – ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Speicherung von Informationen in künftigen Quantencomputern. Die Wissenschaftler um Brian Julsgaard vom Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen schickten Laserpulse aus nur wenigen Photonen durch Cäsiumatome, die sie bei Zimmertemperatur in einer Glaszelle eingeschlossen hatten. Über die gegenseitige Wechselwirkung wurden die Photonen und Atome »verschränkt«, sodass sie sich in einem gemeinsamen, identischen Quantenzustand befanden. Mit Hilfe des Lichtsignals, das wieder aus der Zelle herauskam, rekonstruierten die Forscher dann das so genannte Quantenrauschen der Cäsiumteilchen vor Beginn der Prozedur und sandten dieses Signal in einer Rückkopplungsschleife in die Glaszelle zurück. Damit war die Speicherung abgeschlossen.

Dass die Atome tatsächlich den Informationsgehalt der Photonen übernommen hatten, zeigte das Forscherteam anschließend, indem es ihren Polarisationszustand maß und mit dem des ursprünglichen Laserpulses verglich. Die Übereinstimmung war mit siebzig Prozent nicht perfekt, entsprach jedoch dem, was die Forscher im Rahmen der experimentellen Beschränkungen erwarten konnten.

(Nature, 25.11.2004, S. 482)



NIELS BOHR INSTITUT / MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK / NATURE

◄ Gasförmige Cäsiumatome in einer paraffinumhüllten Glaszelle lassen sich als Quantenspeicher einsetzen. Die äußeren Zylinder schirmen störende Magnetfelder ab.

MATERIALFORSCHUNG

Plastik aus Orangenschalen

■ Biegt man die Schalen von Zitrusfrüchten, treten wohlriechende ätherische Öle aus. Bei Orangen besteht diese Flüssigkeit zu gut neunzig Prozent aus der Substanz Limonen, die als preiswerter Duftstoff, Geschmacksverbesserer und Lösungsmittel industriell genutzt wird. Doch mit dem nach Zitrone riechenden Öl, das zu den Terpen-Kohlenwasserstoffen gehört, lassen sich noch ganz andere Dinge anstellen. Wie nun ein Team um Geoffrey Coates von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) nachwies, taugt die Substanz auch als Ausgangsmaterial für einen neuartigen Kunststoff.

Die Chemiker ließen Limonen zunächst mit Sauerstoff reagieren. Das Oxid setzten sie dann in Gegenwart eines Katalysators mit Kohlendioxid um. Dabei entstand ein Polycarbonat: ein Kunststoff mit ähnlichen Eigenschaften wie Styropor. Er böte einen ökologisch vorteilhaften Ersatz für dieses weit verbreitete Dämm- und Verpackungsmate-



Wie neue Aufnahmen der Raumsonde Cassini zeigen, verläuft auf dem Saturnmond Japetus längs des Äquators ein rätselhafter Wulst.

NASA / JPL / SSI

rial, da er aus nachwachsenden statt petrochemischen Rohstoffen hergestellt würde – noch dazu unter Verbrauch von Kohlendioxid, das als Treibhausgas die globale Erwärmung antreibt. Limonen kommt in mehr als 300 Pflanzenarten vor – außer in Zitrusfrüchten auch in den Nadeln mancher Koniferen. Mehr als 50 000 Tonnen der vielseitigen Substanz werden pro Jahr weltweit produziert. *(Journal of the American Chemical Society, Bd. 126, S. 11404)*

ZOOLOGIE

Warmer Blick des Jägers

In den Tiefen des Ozeans herrschen extreme Bedingungen. Wer überleben will, muss gegen Druck, Kälte oder Dunkelheit gewappnet sein. So erhöht manch ein Meerestier seine Betriebstemperatur, um schneller zu schwimmen. Doch die Ganzkörperheizung, die sich zum Beispiel einige Haiarten leisten, verbraucht sehr viel Energie. Der Schwertfisch *Xiphias gladius* ist da nicht so verschwenderisch. Wie Biologen der Universität von Queensland in Sydney gemeinsam mit Kollegen aus den USA und Schweden herausfanden, heizt er bei der Jagd selektiv nur einen Muskel hinter den Augen und das Gehirn. Dadurch wird die Retina bis zu 15 Grad Celsius wärmer als das umgebende Wasser. Um den Sinn dieser Maßnahme zu ergründen, brachten die Forscher Elektroden auf der Netzhaut der Tiere an und maßen so deren neurale Reaktionen. Dabei zeigte sich, dass die Retinazellen dank der Erwärmung deutlich schneller ansprechen. Das Auge kann bewegte Bilder somit zeitlich besser auflösen. Dadurch erspäht *Xiphias* in 300 Meter Tiefe seine Beute bis zu siebenmal schneller als diese ihn.

(Current Biology, 11.01.2005, S. 55)



KERSTIN A. FRITSCHES, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

Der Schwertfisch *Xiphias gladius* erwärmt seine Augen auf 19 bis 28 Grad Celsius, damit er seine Beute schneller sieht.



ARCHÄOLOGIE

Steinalter Wein aus China

Laut Bibel war Noah der erste Weinbauer. Archäologen orteten die frühesten Liebhaber alkoholischer Getränke dagegen bisher in Babylonien, wo auf 7000 Jahre alten Tontafeln Bierrezepte verzeichnet sind. Doch nun zeigte sich, dass sich die Chinesen schon vor mindestens 9000 Jahren an Rebensaft labten.

Bei Grabungen im jungsteinzeitlichen Dorf Jiahu in der Provinz Henan fand ein internationales Archäologenteam um Patrick McGovern an der Universität von Pennsylvania in den Scherben von Tonkrügen noch Spuren einer gegorenen Flüssigkeit. Wie gaschromatografische und massenspektrometrische Analysen ergaben, war das alkoholische Getränk einst aus Honig, Reis und Früchten – vermutlich wilden Trauben oder Weißdornbeeren – hergestellt worden.

Die Wissenschaftler konnten die Reste des berauschenden Trunks nur entdecken, weil in Henan schon sehr früh Tonwaren hergestellt wurden. Behältnisse aus Holz oder Leder hätten die Jahrtausende nicht überstanden. Dass die Flüssigkeit vermutlich ehemals aus Wein bestand, zeigte der Vergleich mit einem etwa 3000 Jahre alten Tropfen aus der Shang-Dynastie, der in luftdicht verschlossenen Bronzebehältern bis heute erhalten blieb.

(Proceedings of the National Academy of Science, 10.1073/ pnas. 0407921102)

PATRICK MCGOVERN, UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA

Diese 9000 Jahre alten Tonkrüge aus China enthalten Überreste eines weinartigen Getränks.



MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON JOHN MEGAHAN

Einst beherrschte der Haastadler den Luftraum Neuseelands. Wie seine bevorzugte Beute, der Moa, ist er heute ausgestorben.

EVOLUTION

Raubvogel im Schlaraffenland

Auf Neuseeland gab es bis zur Besiedlung durch die Maori mit Ausnahme dreier Fledermausarten keine Landsäugetiere. Die entsprechenden ökologischen Nischen besetzten etwa 250 Vogelarten. An der Spitze der Nahrungskette stand der Haastadler: ein mächtiger Greifvogel mit einer Flügelspannweite von etwa drei Metern und bis zu fünfzehn Kilogramm Gewicht. Seine bevorzugte Beute war der Moa. Dieser flugunfähige Laufvogel ist wie sein Jäger inzwischen ausgestorben.

Die Herkunft des Haastadlers war bislang ein Rätsel. Doch ein internationales Forscherteam konnte es jetzt mit Hilfe fossiler Knochenfragmente lösen. Dazu verglichen die Paläobiologen das 2000 Jahre alte Erbgut mit dem heutiger Greifvogelarten. Die DNA-Analyse ergab eine enge Verwandtschaft mit dem ziemlich kleinen Kaninchenadler, der allenfalls ein Kilogramm auf die Waage bringt. Beide Greifvögel stammen nach Meinung der Forscher von einem Urahn ab, der vor nur etwa einer Million Jahren lebte. In dieser evolutionsbiologisch sehr kurzen Zeit hatte der Haastadler sein Gewicht mehr als verzehnfacht. Das war wohl nur möglich, weil es in Neuseeland reichlich Beute und keine Nahrungskonkurrenten am Boden gab.

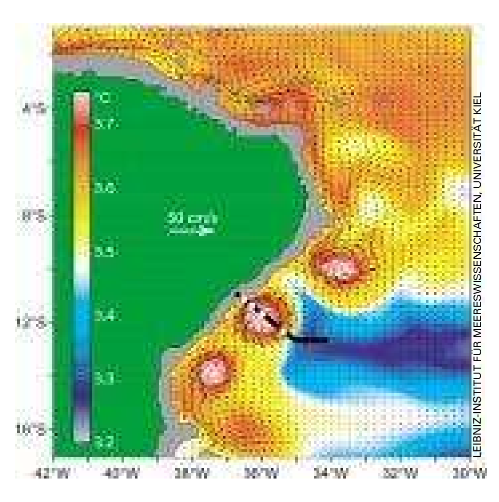
(Plos Biology, Januar 2005, S. 44)

OZEANOLOGIE

Hurrikane unter Wasser

Nicht nur der Golfstrom mäandriert und bildet dabei Ringe – auch in tieferen Schichten des Atlantiks entdeckten Forscher jetzt Wirbel. Sie haben Durchmesser von etwa 300 Kilometern und wandern mit 150 Metern pro Stunde an der brasilianischen Küste entlang nach Südwesten. Marcus Dengler und seine Kollegen von der Universität Kiel erkundeten mit Sonden, die sie ins Meer absenkten, wie schnell das Wasser am Kontinentalschelf vor Südamerika entlangströmt. In 2000 Meter Tiefe registrierten akustische Doppler-Strömungsmesser starke Schwankungen der Geschwindigkeit mit einer Periode von sechzig Tagen. Die einzig plausible Erklärung dafür sind riesige Wirbel, über deren Existenz bislang nur gemutmaßt wurde.

In 1900 Meter Tiefe vor der Küste Brasiliens bilden sich in einer Computersimulation riesige Wirbel. Sondenmessungen (an der schwarzen Linie) haben jetzt den Realitätsbeweis dafür erbracht.



LEIBNIZ-INSTITUT FÜR MEERESWISSENSCHAFTEN, UNIVERSITÄT KIEL

Die südwestliche Tiefenströmung ist Teil einer großräumigen Ozeanzirkulation, die an der Oberfläche warmes Wasser in den Nordatlantik verfrachtet und so für mildes Klima in Europa sorgt. Nach dem Absinken im Eismeer strömt das Wasser in der Tiefe nach Süden zurück. Durch die globale Erwärmung könnte sich diese Zirkulation in Zukunft verlangsamen. Was der Hollywoodfilm »The Day after Tomorrow« zur Apokalypse aufbauschte, ließe sich durch Beobachtung der Wirbel überwachen. Nach Computersimulationen der Kieler Forscher sollten diese verschwinden, sobald sich die Strömung abschwächt und laminar wird. *(Nature, 23./30.12.2004, S. 1018)*

PALÄANTHROPOLOGIE

Frühester Menschenaffe

Ein in Spanien gefundenes, 13 Millionen Jahre altes Skelett stammt vermutlich vom frühesten gemeinsamen Urahn der Menschenaffen und Menschen. Diese haben sich vor 11 bis 16 Millionen Jahre von den übrigen Primaten abgespalten, zu denen zum Beispiel die Gibbons gehören. Die Urahnspezies wurde nach dem Fundort des Fossils – einem Dorf nahe Barcelona – *Pierolapithecus catalaunicus* benannt.

Salvador Moyà-Solà von der Escola Industrial in Barcelona und seine Kollegen konnten aus 83 gefundenen Knochen und Knochenfragmenten ein weit gehend vollständiges Skelett rekonstruieren, das zu einem etwa 35 Kilogramm schweren männlichen Tier gehört und viele typische Merkmale von Menschenaffen zeigt. So ist sein Brustkorb breiter und flacher als bei den primitiveren Primaten, und seine Schulterblätter befinden sich auf dem Rücken statt an der Seite. Dies und die kurzen, versteiften Lendenwirbel erleichterten es dem Tier, eine aufrechte Position einzunehmen. Zu den typischen Kennzeichen von Menschenaffen zählt ferner ein relativ flaches, gedrungenes Gesicht, in dem die Nasenwurzel in einer Ebene mit den Augen liegt. Allerdings weist *P. catalaunicus* auch einige primitive Merkmale wie recht kurze Finger und Zehen auf.

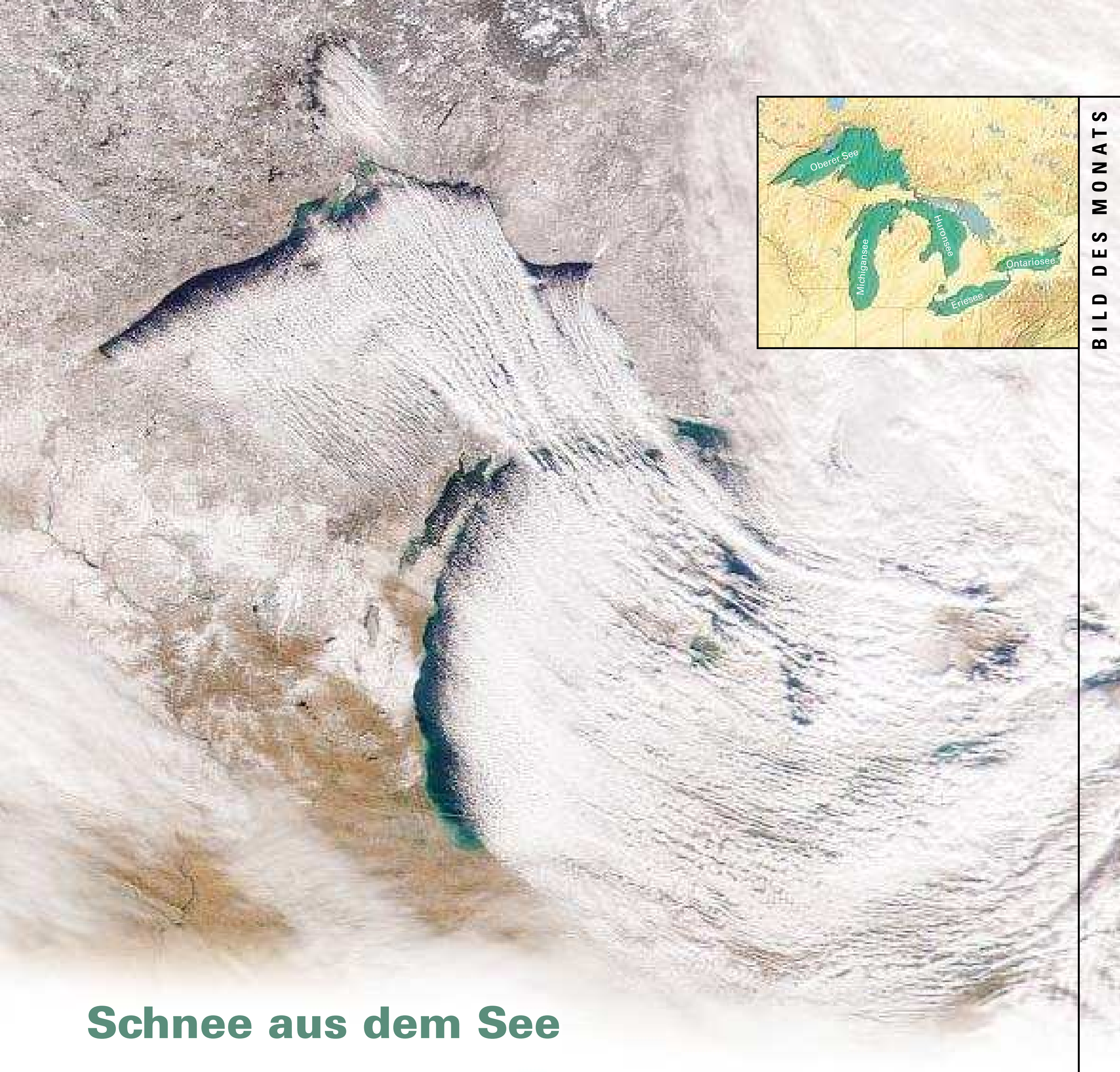
(Science, 19.11.2004, S. 1339)

Sah so der älteste gemeinsame Urahn von Menschen und Menschenaffen aus?



SCIENCE, BD. 306, 19.11.2004 / AAAS / TODD MARSHALL

Mitarbeit: Kerstin Beckert und Sven Titz



GROSSES BILD: NASA / GSFC / SEAWIFS; KLEINES BILD: USGS

Schnee aus dem See

In der Umgebung der nordamerikanischen großen Seen fällt im Winter regional begrenzt oft mehr als ein Meter Schnee in wenigen Tagen. Der Grund ist ein Phänomen, das US-Meteorologen als »sea-effect snow« bezeichnen. Die großen Seen frieren wegen ihres riesigen Wasservolumens und der darin gespeicherten Wärme selten zu. Meist haben sie deshalb im Winter eine höhere Temperatur als die angrenzende Atmosphäre. Wenn nun kalte, trockene Luft aus der Polarregion über ein solches Gewässer hinwegstreicht, wird sie angewärmt und befeuchtet. Dadurch nimmt ihre Dichte ab und sie steigt auf. Zum Ausgleich sinkt benachbarte Luft ab. So kommt es zu einem Konvektionsmuster aus langen, röhrenförmigen Walzen, die in konstantem Abstand parallel nebeneinander angeordnet sind.

Da sich die aufsteigende Luft abkühlt, kondensiert die aufgenommene Feuchtigkeit darin aus und gefriert zu Eiskristallen. Das Ergebnis sind Schneewolken, die sich wegen des walzenartigen Konvektionsmusters in schmalen parallelen Streifen aneinander reihen. Das erweckt in dieser Aufnahme, die der Satellit SeaWiF von einem »lake-effect snow«-Ereignis über dem Oberen und dem Michigansee (siehe eingeklinkte Karte) gemacht hat, den kuriosen Eindruck von Teppichfransen.

Solange die Windverhältnisse bestehen bleiben, ist die Konvektionsströmung meist sehr stabil, sodass die schmalen Wolkenstreifen an Ort und Stelle bleiben. Unter ihnen kann es dann tagelang ununterbrochen schneien, während in den Lücken dazwischen gar kein oder nur wenig Schnee fällt.

PLANETOLOGIE

Erdgas-Regen auf Titan

Exotisch fremd und doch vertraut: Die Welt auf dem Saturnmond, wie Europas Huygens-Sonde sie jetzt enthüllte, ähnelt mit ihren ausgetrockeneten Flussbetten und Seen frappierend unserer eigenen – nur dass statt Wasser Methan fließt.

Von Thorsten Dambeck

Es war ein großer Tag für die Europäische Weltraumagentur (Esa): Am Morgen des 14. Januar erreichte die Sonde Huygens den Saturnmond Titan – 350 Jahre, nachdem ihr Namenspatron, der holländische Naturforscher Christiaan Huygens, den planetengroßen Himmelskörper entdeckt hatte.

Über sieben Jahre lang war das von der Esa gebaute Raumfahrzeug gemeinsam mit der US-Sonde Cassini zum Ringplaneten gereist. Zu Weihnachten trennte es sich dann von seinem Begleiter, schlug einen Kollisionskurs mit Titan ein und flog drei Wochen lang antriebslos, bis es an jenem Morgen in die smogverhangene Gashülle des Riesenmonds stürzte. Zweieinhalb Stunden später setzte die automatisch gesteuerte Sonde, am Fallschirm schwebend, sanft am Boden auf.

Es war die erste weiche Landung eines Raumfahrzeugs auf einem Himmelkörper jenseits des Mars. Unter großer Anteilnahme der internationalen Öffentlichkeit funkte das DISR-Instrument (»Descent Imager and Spectral Radiometer«) an Bord von Huygens während des Abstiegs und der Landung Bilder und Messdaten zur Erde, wobei Cassini als Relaisstation half.

Rund 350 Fotos gingen so bei der Esa ein. Sie zeigten zunächst einmal, dass die Gashülle Titans noch trüber ist als bisher schon vermutet. »Erst 20 bis 30 Kilometer über dem Boden klärte sich die Sicht und der Blick auf die Oberfläche wurde frei. Dass der Smog so weit nach unten reicht, war eine Überraschung«, kommentierte Tetsuya Tokano von der Universität Köln, der an der Auswertung der Huygens-Daten beteiligt ist. Unterhalb der Sichtgrenze bot sich den Kameraaugen schließlich eine seltsam vertraute Szenerie: eine fremdartige Welt, die dennoch frappierend an die Erde erinnerte.

Tatsächlich scheint die Oberfläche von Titan ebenso dynamisch zu sein und durch ähnliche Prozesse gestaltet zu werden wie unser Planet. »Wir haben Belege für Niederschläge, Erosion, mechanische Abtragungen und andere Einwirkungen von Flüssigkeiten auf der Oberfläche«, sagt DISR-Projektleiter Martin Tomasko von der Universität von Arizona in Tempe. Nur die Zutaten der exotischen Wetterküche sind ganz andere als bei uns: Wassereis, flüssiges Methan und Smog.

Das ergibt sich unter anderem aus ersten Analysen der von Huygens gefunkten Spektren. Danach bestehen große Teile der Titan-Oberfläche überwiegend aus Wassereis. Das gilt etwa für die hellen, abgerundeten Brocken, die Huygens direkt neben der Landestelle ablichtete. Bei –179 Grad Celsius Oberflächentemperatur sind sie allerdings steinhart. Auch helle, wallartige Strukturen scheinen aus gefrorenem Wasser zu bestehen, das aus dem Untergrund nach oben gedrückt wurde.

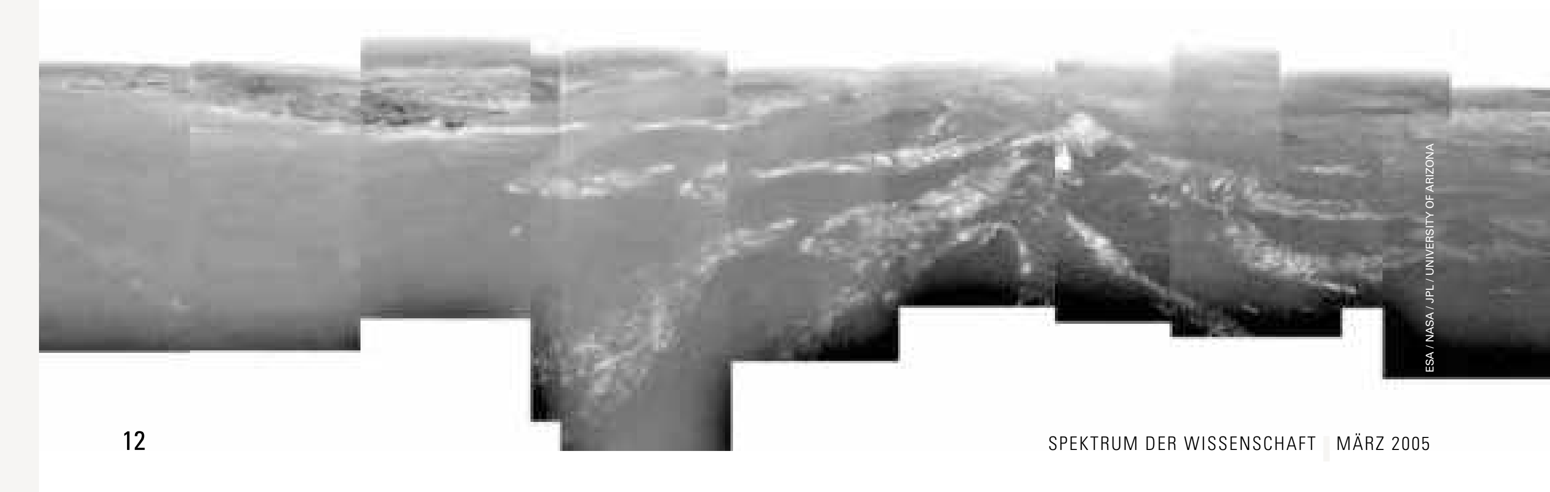
Daneben ist auf den Fotos feinkörnigeres Bodenmaterial zu erkennen. Die Wissenschaftler halten es für eine Mixtur aus zerstoßenem Wassereis und organischen Verunreinigungen. Eindeutige Hinweise auf Silikatgestein, das die Oberflächen der erdähnlichen Planeten prägt, fanden sich dagegen nicht. Allerdings könnte es in der Tiefe vorkommen. Darauf deuten Spuren von Argon in der Gashülle Titans, das durch radioaktiven Zerfall aus kaliumhaltigem Gestein entweicht.

Weiches Material unter harter Kruste

Ansonsten wird die Atmosphäre des Saturnmonds genau wie die irdische von Stickstoff dominiert. Zweitwichtigste Komponente ist Methan, bei uns als brennbarer Hauptbestandteil von Erdgas geschätzt. Sein Anteil variiert zwischen zwei Prozent in der Hochatmosphäre und dem doppelten Wert dicht über der Oberfläche. Offenbar wirkt der Boden als Methanquelle.

Das belegen auch Messungen an der Landestelle. Als Huygens mit einer Geschwindigkeit um die zwanzig Kilometer pro Stunde aufschlug und dabei zehn bis fünfzehn Zentimeter tief einsank, scheint durch die Abwärme einer Lampe etwas flüssiges Methan im Boden verdunstet zu sein – jedenfalls registrierten die Bordgeräte wenige Minuten später einen kurzen Anstieg der Gaskonzentration um dreißig Prozent.

Beim Abstieg zur Titanoberfläche fotografierte Huygens ein ziemlich erdähnliches Panorama mit hügeligem Gelände und flachen Tiefebenen.


ESA / NASA / JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA



NASA / JPL / CRAIG ATTEBERY

Die Raumsonde Huygens wurde beim Eintritt in die Atmosphäre von Titan von einem später abgeworfenen Hitzeschild geschützt. Am Ende schwebte sie an einem Fallschirm zu Boden.

Als Erstes drang der etwa zwanzig Zentimeter lange Messstab des »Surface Science Package« in den Boden ein. Noch bevor die 343 Kilogramm schwere Sonde aufsetzte, ermittelte dieser den mechanischen Widerstand des Untergrunds. Dabei stieß er unter einer dünnen harten Kruste auf erheblich weicheres Material. Laborexperimente legen nahe, dass es sich dabei um Ansammlungen feinkörniger Eispartikel handeln könnte, eine Art Gegenstück zu irdischem Sandboden.

Schon am Tag der Landung präsentierte die Esa mehrere DISR-Fotos. Luftaufnahmen aus rund 15 Kilometer Höhe zeigen Landschaften mit einem verzweigten System dunkler Rinnen, die wie Abflusskanäle aussehen. Sie führen aus vergleichsweise hellen Hochländern in eine dunkle Tiefebene. Missionsleiter Jean-Pierre Lebreton ist überzeugt, dass sie von Überschwemmungen durch Methan-Niederschläge herrühren.

Dafür spricht nicht nur die Analyse von Stereobildern des Kanalsystems, sondern auch der hohe Verzweigungsgrad der Gräben. Momentan scheinen sie allerdings keine nennenswerten Flüssigkeitsmengen zu führen. Außerdem konnte die Esa-Sonde weder am Boden noch während des Abstiegs Regen beobachten. Die von vielen vermuteten Methan-Meere bekam sie im ewigen Dämmerlicht – die Helligkeit auf Titan beträgt nur rund ein Tausendstel derjenigen auf der sonnenbeschienen Erdseite – gleichfalls nicht vor die Linse.

Trotzdem muss es nach Ansicht der Forscher auf dem Saturnmond immer wieder einmal regnen. Tomasko fühlt sich an seine Heimat Arizona erinnert. »Das ist mit einer irdischen Trockenzone vergleichbar, wo die Flüsse nur zwischenzeitlich Wasser führen.« Außerdem könnte flüssiges Methan auch direkt dem Boden entspringen: Kürzere, weniger verzweigte Kanäle deuteten die Planetenforscher als Hinweis auf gelegentlich sprudelnde Methan-Quellen.

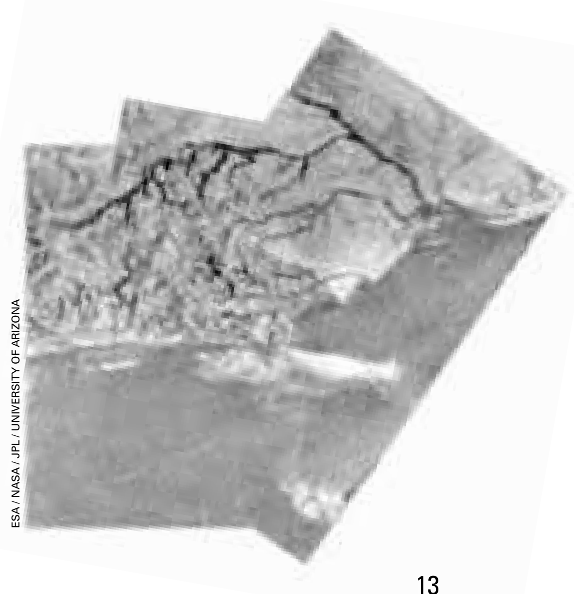
Smog und Flüsse

Das dunklere Material in den Kanälen entstammt dem fotochemischem Smog, der in rund 300 Kilometer Höhe über der Oberfläche entsteht. Dort spaltet UV-Licht Wasserstoffatome vom Methan ab. Dabei entstehen energiereiche Radikale, die miteinander zu einem Cocktail aus längerkettigen Kohlenwasserstoffen und komplizierteren organischen Molekülen reagieren können. Das Endprodukt sind jene orangefarbenen Schwebteilchen, aus denen der Dunstschleier um Titan besteht.

»In der Troposphäre, dort, wo die Gashülle transparenter wird, waschen Methan-Niederschläge die Aerosole aus. Sie fallen mit dem Regen zu Boden«, vermutet Meteorologe Tokano. Das Methan fließt in den Kanälen Richtung Tiefebene und versickert. Die organischen Verbindungen bleiben dabei am Grund der Kanäle und in der Ebene als eine Art Schlamm zurück.

Die Landestelle von Huygens liegt bei rund zehn Grad südlicher Breite, genau im Grenzgebiet zwischen hellen und dunklen Regionen. Schon Cassinis Kamera war beim ersten Vorbeiflug dieser Kontrast auf der Titan-Oberfläche aufgefallen. Auch in dem dunklen Flachland fanden die Forscher Hinweise auf ehemals strömende Flüssigkeiten. Fotos aus der Vogelperspektive, die Huygens beim Abstieg schoss, zeigen tropfenförmige Vertiefungen, die hellere »Inseln« – wahrscheinlich aus Wassereis – umgeben. Ähnliche Bilder kennt man von ausgetrockneten Überschwemmungsgebieten auf dem Mars. Weiterhin fielen den Forschern zahlreiche elliptische Regionen in der Ebene auf – vermutlich ausgetrocknete Methan-Tümpel, in denen sich noch letzte Flüssigkeitsreste hielten, als die dunkle Brühe in der Umgebung schon im Boden versickert oder verdunstet war.

Während seines Sturzflugs lauschte Huygens auch mit einem Mikrofon nach Geräuschen. Die Forscher hofften, dabei das Donnergrollen titanischer Gewitter ▷



ESA / NASA / JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

Auf diesem Mosaik aus drei Huygens-Aufnahmen erscheint ein verzweigtes Flusssystem, das von einer hellen Hochebene in ein dunkleres Tiefland zieht.


ESA / NASA / JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

◀ Der Blick von Huygens auf die Landestelle zeigt eine orangefarbene Ebene, die mit bis zu 16 Zentimeter großen Eisbrocken übersät ist.

▷ aufzufangen. Doch das Gerät registrierte nichts dergleichen. Immerhin fand sich laut Tokano in anderen Messdaten ein »elektrisches Ereignis«, das noch weiter analysiert werden müsse. Es könnte sich um ein »natürliches Phänomen« – wie zum Beispiel einen Blitz – handeln, aber auch von der Sonde selbst stammen.

Mit dem »Doppler Wind Experiment« (DWE) wollten die Forscher außerdem das Höhenprofil der Windgeschwindigkeiten ermitteln. Doch der zuständige Empfänger an Bord von Cassini versagte und die Daten galten zunächst als verloren. Diesem Fehler fielen auch die Hälfte der DISR-Fotos zum Opfer. DWE-Projektleiter Michael Bird von der Universität Bonn ist aber zuversichtlich, dass sich die Messergebnisse anhand der Aufzeichnungen irdischer Radioteleskope hinreichend genau rekonstruieren lassen. Die Radiosignale von Huygens wurden während des ruppigen Abstiegs nämlich trotz der 1,2 Milliarden Kilometer Entfernung auch direkt von der Erde aus verfolgt und von Riesenantennen auf verschiedenen Kontinenten selbst noch Stunden nach der Landung empfangen. Da war Cassini auf seinem Vorbeiflug längst unter der Horizontlinie der Huygens-Landestelle verschwunden, sodass keine Funkverbindung mehr bestand. Niemand hatte in seinen kühnsten Träumen erwartet, dass der erste irdische Kundschafter der unwirtlichen Eiswüste auf dem Saturnmond derart lange trotzen würde.

Thorsten Dambeck ist Physiker und Wissenschaftsautor in Berlin.

MOLEKULARBIOLOGIE

Pacman stoppt Kopiermaschine

Wenn das Enzym, das Gene abschreibt, übers Ziel hinausschießt und nur noch Ausschuss produziert, muss es gewaltsam angehalten werden. Die Zellen von Hefen und Menschen schicken ihm dazu einen molekularen Torpedo hinterher.

Von Michael Groß

Es ist gut zu wissen, wann man aufhören muss. Wenn ich zum Beispiel diesen Satz, obwohl ich meine Aussage schon formuliert habe, immer weiter schreiben würde und weiter und weiter und weiter, und es käme nur noch Blödsinn dabei heraus und Sie würden mich langsam für verrückt halten und denken, warum macht er denn nicht endlich Schluss … es wäre pure Verschwendung von Zeit, Papier und Druckerschwärze.

Genau diesen Luxus leistet sich aber die RNA-Polymerase II: jenes Enzym, das Arbeitskopien von Genen erstellt, auf denen im DNA-Alphabet die Bauanleitungen für Proteine stehen. Dabei fährt es am Nucleinsäurefaden der Erbsubstanz entlang und erzeugt – getreulich Buchstabe für Buchstabe – eine Abschrift im leicht abweichenden RNA-Dialekt: die so genannte Boten-RNA. Diese dient dann als Vorlage für den Zusammenbau des Proteins an den Ribosomen, den Eiweißfabriken der Zelle.

Nun enthält jedes Gen zwei klare Hinweise auf sein Ende. Da ist zuerst das Stoppsignal, an dem später das Ribosom erkennt, dass es am Schluss der Bauanleitung angekommen ist. Und dahinter gibt es noch jene genau markierte Stelle, wo an die fertige Boten-RNA – quasi als Zierschleife – noch ein nur aus dem Buchstaben A bestehender Poly-A-Schwanz angehängt wird.

Enzym kennt kein Halten

Doch die Polymerase ist blind für diese Fingerzeige: Wie ein Roboter bewegt sie sich einfach weiter am DNA-Faden entlang und fährt mit dem Abschreiben fort. Derweil haben andere Enzyme, die sich vorübergehend an einen stielartigen Fortsatz auf der Außenseite der Kopiermaschine geheftet hatten, die fertige Boten-RNA längst an der Markierung für die Zierschleife abgeschnitten und sind auf sie übergewechselt, um den Poly-A-Schwanz anzubringen. Bisher ließ sich kein DNA-Abschnitt identifizieren, der die Polymerase zum Anhalten bringt. Man wusste nur, dass sie irgendwann doch noch aufhört, aber nicht wo, wieso und wie.

Jetzt endlich ist auch dieses Geheimnis gelüftet – und die Lösung erweist sich als äußerst kurios. Drei Arbeitsgruppen entdeckten sowohl bei der Hefe als auch beim Menschen, dass die Zelle gleichsam einen Torpedo losschickt, um die übers Ziel hinausgelaufene Kopiermaschine zur Raison zu bringen. Das Geschoss besteht aus einer Exonuclease: einem RNA-verdauenden Enzym, das Nucleinsäurefäden vom Ende des Strangs her abbaut. Es heftet sich an den Stiel der Polymerase, nachdem die Kollegen, die für das Abschneiden der Boten-RNA und das Anfügen des Poly-A-Schwanzes zuständig waren, den Platz geräumt haben. Dort bekommt es irgendwann das freie Ende der im Überschuss produzierten RNA zu fassen, schwingt sich hinüber und macht sich im Eiltempo daran, den unnützen Faden wieder in seine Bausteine zu zerlegen. Da der Torpedo schneller vorankommt als die Polymerase, holt es diese schließlich ein und bringt sie dazu, anzuhalten und sich vom Erbmolekül zu lösen.

Die Basisversion dieses Mechanismus entdeckten Stephen Buratkowski und seine Mitarbeiter an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) bei der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*. Es gelang ihnen, die zuständige Exonuclease namens Rat1 zu identifizieren – samt zwei Hilfsproteinen, die den Torpedo anfangs mit der Polymerase verbinden. Der Funktion des Enzyms kamen die US-Forscher auf die Spur, als sie es gentechnisch ausschalteten. Hefekulturen ohne Rat1 erwiesen sich zwar als überlebensfähig. In ihren Zellen fanden sich aber erhebliche Mengen sinnloser RNA-Fäden – offenbar Produkte von ungebremst weiterlaufenden RNA-Polymerasen *(Nature, Bd. 432, S. 517)*.

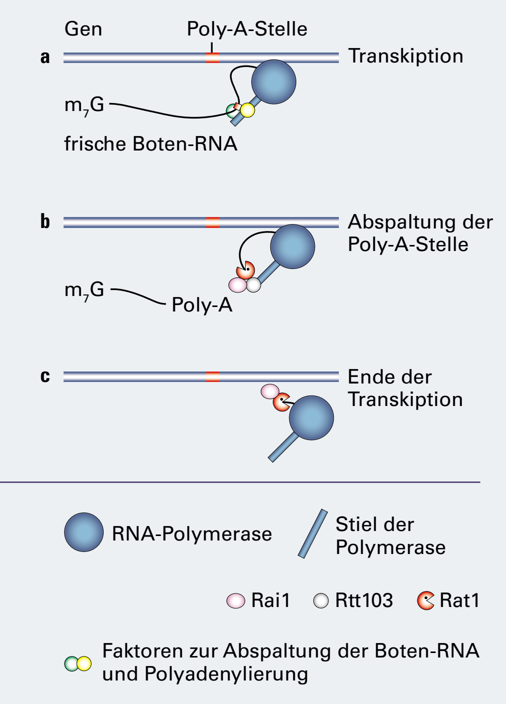
Nick J. Proudfoot und seine Mitarbeiter an der Sir William Dunn School of Pathology in Oxford erforschten denselben Vorgang beim Menschen. Als Untersuchungsobjekt wählten sie das Gen für das Globin, das in Verbindung mit dem Häm den roten Blutfarbstoff Hämoglobin bildet. Dem Rat1 der Hefe entspricht bei unserer Spezies eine Exonuclease namens Xrn2. Indem die Oxforder Forscher – analog zu den Experimenten der Gruppe um Buratkowski – dieses Enzym ausschalteten, konnten sie nachweisen, dass es zum Stoppen der Polymerase nötig ist *(Nature, Bd. 432, S. 522)*. In diesem Fall tritt allerdings, wie man schon seit einigen Jahren weiß, eine zusätzliche Komplikation auf. Demnach wird der von der DNA-Polymerase produzierte RNA-Faden gleich an zwei Stellen abgeschnitten: nicht nur an dem üblichen Anknüpfpunkt für den Poly-A-Schwanz, sondern ein gutes Stück dahinter noch einmal.

Eine Schere schneidet sich selbst

Forscher um Alexandre Akoulitchev, die am selben Institut wie Proudfoot arbeiten, konnten nun klären, was es mit dieser zusätzlichen Trennstelle auf sich hat *(Nature, Bd. 432, S. 526)*. Sie entdeckten, dass ein so genanntes Ribozym dahinter steckt: eine enzymatische Schere, die sich selbst aus einem RNA-Strang herausschneiden kann.

Durch Mutationsexperimente kreisten Akoulitchev und seine Mitarbeiter den kleinsten für die Ribozym-Aktivität hinreichenden RNA-Abschnitt ein und wiesen nach, dass die Polymerase nur dann mit dem sinnlosen Abschreiben aufhört, wenn dieser Abschnitt vorhanden und funktionstüchtig ist. Offenbar erzeugt die Schere einen geeigneten Startpunkt für Xrn2. Die erste Schnittstelle direkt am Ende der Boten-RNA, die von dem Hefe-Enzym Rat1 erkannt wird, scheint diese Aufgabe beim ▷

Wie ein übereifriges Enzym torpediert wird



Beim Abschreiben eines Gens schießt die DNA-Polymerase über dessen Ende hinaus und produziert einen weiter wachsenden RNA-Strang. Die eigentliche Boten-RNA wird derweil von Enzymen (grün und gelb), die zuvor am langen, dünnen »Stiel« der Polymerase saßen, an der Ankopplungsstelle für den Poly-A-Schwanz abgeschnitten (a). An den frei gewordenen Stiel kann sich nun mit Hilfe der Proteine Rtt103 und Rai1 die Exonuclease Rat1 binden. Dort bekommt sie über kurz oder lang das lose Ende der sinnlos weiter synthetisierten RNA zu fassen, hängt sich daran und baut sie schrittweise ab (b). Schließlich holt sie die Polymerase ein und bringt sie (auf noch unbekannte Weise) dazu, sich von der DNA zu lösen. Der dargestellte Vorgang gilt für die Bäckerhefe und ist bei menschlichen Zellen noch erheblich komplizierter.

NATURE, BD. 432, S. 457, 25. NOVEMBER 2004

menschlichen Globin-Gen nicht zu erfüllen.

Nicht einmal jedes x-beliebige Ribozym genügt den Ansprüchen von Xrn2. Das entdeckte die Arbeitsgruppe von Nick Proudfoot, als sie den DNA-Abschnitt für die Originalschere durch den für das – nach seiner Form benannte – Hammerkopf-Ribozym ersetzte, das sich zwar auch selbst herausschneidet, aber eine chemisch unterschiedliche Schnittstelle erzeugt. Daraufhin verschmähte Xrn2 das freigewordene Ende.

Wie so oft in der Wissenschaft werfen diese Befunde mindestens so viele Fragen auf, wie sie beantworten. Eine davon lautet, ob das nachgeschaltete Ribozym eine einmalige Besonderheit des Globin-Gens ist. Rein äußerlich – also anhand seiner RNA-Sequenz – lässt es sich nicht auf Anhieb als enzymatische Schere erkennen. Deshalb glauben die Oxforder Forscher, dass sich auch am Ende von anderen Genen solche atypischen Ribozyme verstecken könnten. Aber das führt gleich zur nächsten, noch schwierigeren Frage: Wieso hat sich überhaupt ein so umständlicher Mechanismus für einen simplen Abschaltvorgang entwickelt? Fast könnte man glauben, die Natur handle nach dem Motto: Warum einfach, wenn es auch kompliziert geht? So interessant die Antwort wäre – derzeit kann sie leider noch niemand geben.

Jetzt habe ich eigentlich schon alles geschrieben, was ich Ihnen über dieses Thema erzählen wollte. Aber wo ich schon einmal in Fahrt bin und mir das Schreiben so Spaß macht, denke ich darüber nach, wie es wäre, wenn mein Computer eine elektronische Rat1-Endonuclease hätte. Dann käme jetzt auf dem Bildschirm eine Art Mini-Pacman hinter meinen völlig überflüssigen Buchstaben hergeschossen und fräße sie alle auf – viel schneller, als ich sie schreiben kann. Irgendwann würde er mich einholen, und dann bliebe mir nichts übrig, als endlich die Finger von den Tasten zu nehmen, weil jeder neu getippte Buchstabe ohnehin sofort wieder verschwände. Aber gottlob ist das nicht der Fall: Sonst hätten Sie diesen Abschnitt schon nicht mehr lesen können, weil er vom Mini-Pacman ratzfatz verschlungen worden wäre.

Michael Groß hat vor einigen Jahren einen Schlusspunkt hinter seine Biochemiker-Karriere gesetzt und ist jetzt freier Wissenschaftsjournalist in Oxford.

KLIMATOLOGIE

Pazifik ließ Europa frieren

Ungewöhlich kalte Winter in unseren Breiten, warme in Alaska und eine dicke Ozonschicht in den Jahren 1940 bis 1942 konnten jetzt auf ein besonders starkes El-Niño-Ereignis zurückgeführt werden.

Von Stefan Brönnimann

Anfang Dezember 1941: Die deutschen Truppen werden auf ihrem Vormarsch kurz vor Moskau von einem plötzlichen Kälteeinbruch überrascht. Ohne Winterausrüstung gibt es kein Weiterkommen mehr; die Front gerät ins Stocken. Was folgt, ist der kälteste Winter des 20. Jahrhunderts in weiten Teilen Europas und der dritte außergewöhnlich strenge in Folge.

Die eisigen Winter während des Zweiten Weltkriegs haben Geschichte gemacht. Weniger bekannt ist, dass das Klima zur selben Zeit auch in anderen Regionen Kapriolen schlug. So war es in Alaska ausgesprochen warm, wobei verheerende Waldbrände auftraten, im Nordpazifik dagegen kühl. Der Sahel litt unter einer Dürre, ebenso Australien und Borneo. Dafür gab es heftige Niederschläge mit Überschwemmungen und Erdrutschen in Peru. Diese gleichzeitigen Anomalien auf allen fünf Kontinenten waren Ausdruck einer Klimaschwankung von globalem Ausmaß.

Datenarchäologie

Diese machte sich nicht nur an der Erdoberfläche, sondern auch in der Stratosphäre bemerkbar. Damals durchgeführte Messungen vom Boden aus zeigen, dass von 1940 bis 1942 die Ozonschicht über mehreren Orten in Mitteleuropa, der Arktis, den USA und China außergewöhnlich dick war. Mit chemischen Vorgängen lässt sich das nicht erklären. Vielmehr weisen solche Ausreißer auf veränderte Zirkulationsverhältnisse in der Stratosphäre hin.

Interessant ist, dass vom Herbst 1939 bis zum Frühling 1942, also genau zeitgleich mit den geschilderten Klimaextremen, ein sehr starker El Niño herrschte – eine Erwärmung des östlichen tropischen Pazifiks, verbunden mit einem Zusammenbruch der Passatwinde und einer Umkehr der Meeresströmungen. Zufall oder nicht?

Die Auswirkungen von El Niño auf Wetter und Klima in Nord- und Südamerika sowie allgemein in den Tropen sind bekannt (Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2002, S. 18). Bisher schien es jedoch, dass sich das Phänomen weder auf Europa noch auf die stratosphärische Ozonschicht merklich auswirkt. Die klimatischen Ereignisse zwischen 1939 und 1942 sind somit nicht nur aus historischer Sicht von Interesse, sondern könnten auch unser wissenschaftliches Bild von El Niño verändern.

Wer diese Frage beantworten will, muss zunächst ein dreidimensionales Bild der Klimaverhältnisse zu jener Zeit erstellen. Das ist keine leichte Aufgabe; denn die Reihe systematischer Messungen oberhalb des Erdbodens reicht nur bis 1948 zurück. Zwar wurden auch vorher schon Daten mit Wetterballonen und Flugzeugen erhoben – im Krieg waren das wertvolle Informationen. Aber niemand machte sich die Mühe, das Material zusammenzustellen und aufzubereiten. Es jetzt in verschiedenen Archiven ausfindig zu machen, erforderte einiges an Recherche. Unterstützt durch den Schweizerischen Nationalfonds und private Stiftungen, konnte ich zwei Jahre lang Messdaten aus Europa, der Sowjetunion und Nordamerika sammeln, dokumentieren und aufbereiten – eine Arbeit, die Klimatologen treffend als »data archaeology« bezeichnen.

Diese alten Angaben liegen meist nur auf Papier vor und müssen zuerst digitalisiert werden. Als Nächstes sind bekann-



NOAA



te Instrumentenfehler wie die Strahlungsanfälligkeit und Zeitverzögerung von Thermometern zu korrigieren. Weil die Daten aus der Anfangszeit der Höhenmessungen stammen und kaum Hintergrundinformation existiert, ist dies ein schwieriges Unterfangen. Zuletzt gilt es, eine strenge Qualitätskontrolle anhand von Vergleichen und statistischen Tests durchzuführen. Am Ende umfasste meine Datenbank mehrere 10 000 Messprofile aus den Jahren 1939 bis 1944.

Der ungewöhnlich strenge Winter 1941/42, der kälteste des Jahrhunderts in weiten Teilen Europas, stoppte den Vorstoß der deutschen Wehrmacht in Russland. Hinter der Serie kalter Winter zwischen 1939 und 1942 steckte nach Erkenntnissen des Autors ein sehr starkes El-Niño-Ereignis im tropischen Pazifik.

Abnorme Wetterverhältnisse

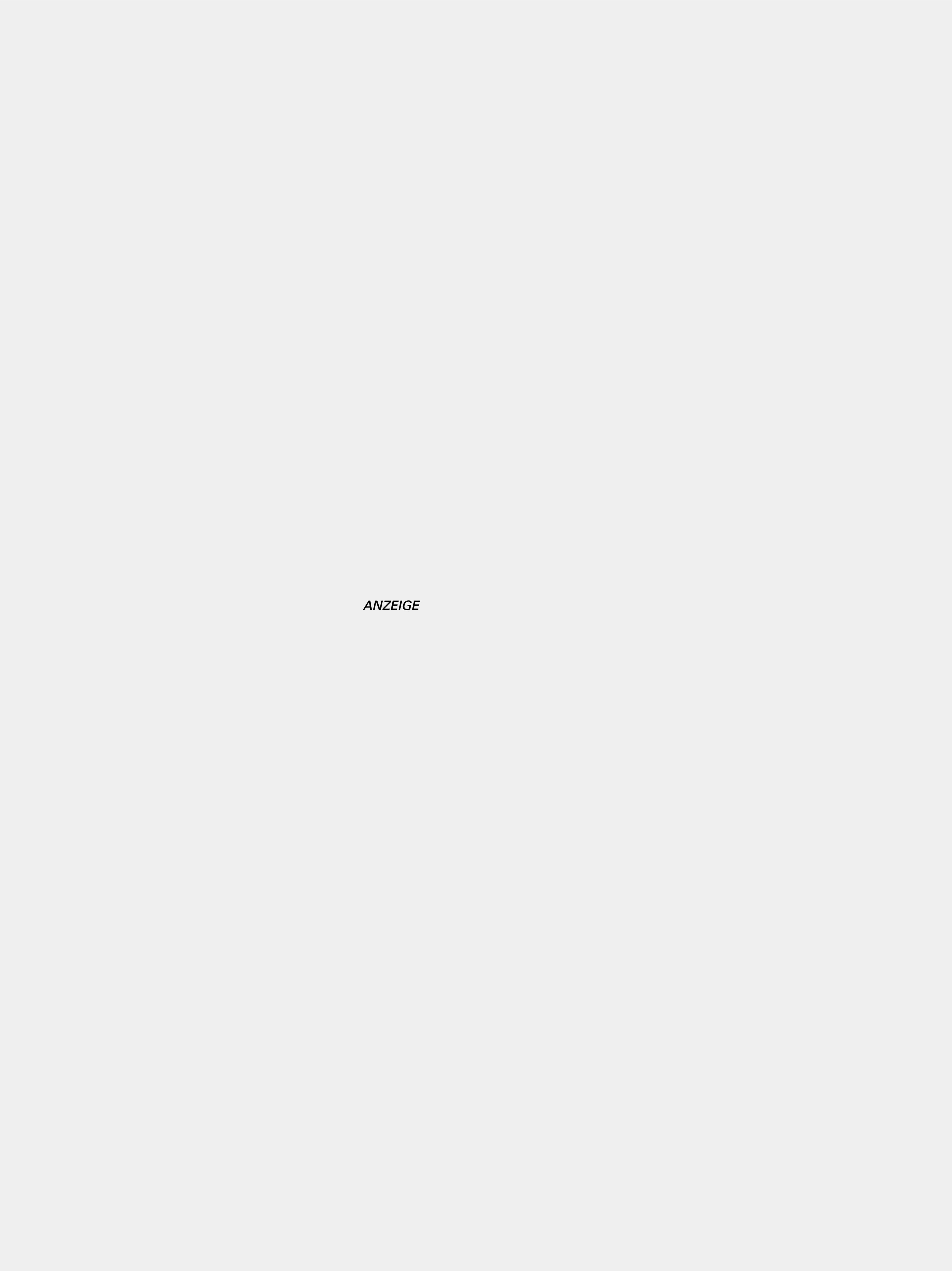
Dieses Material erlaubte aufschlussreiche Analysen der Höhenströmung über einzelnen Orten. Für einen räumlich kompletten Überblick aber mussten statistische Methoden herangezogen werden. Mit ihrer Hilfe rekonstruierte Jürg Luterbacher von der Universität Bern aus den aufbereiteten Daten monatliche Druck- und Temperaturverhältnisse für ein dreidimensionales Gitternetz, das die Nordhalbkugel vom 20. Breitengrad bis zum Pol umfasste und bis in die untere Stratosphäre reichte – auf eine Höhe von ungefähr 15 Kilometern. Damit ließ sich ein detailliertes dreidimensionales Bild der besonderen Klimaverhältnisse von 1940 bis 1942 gewinnen.

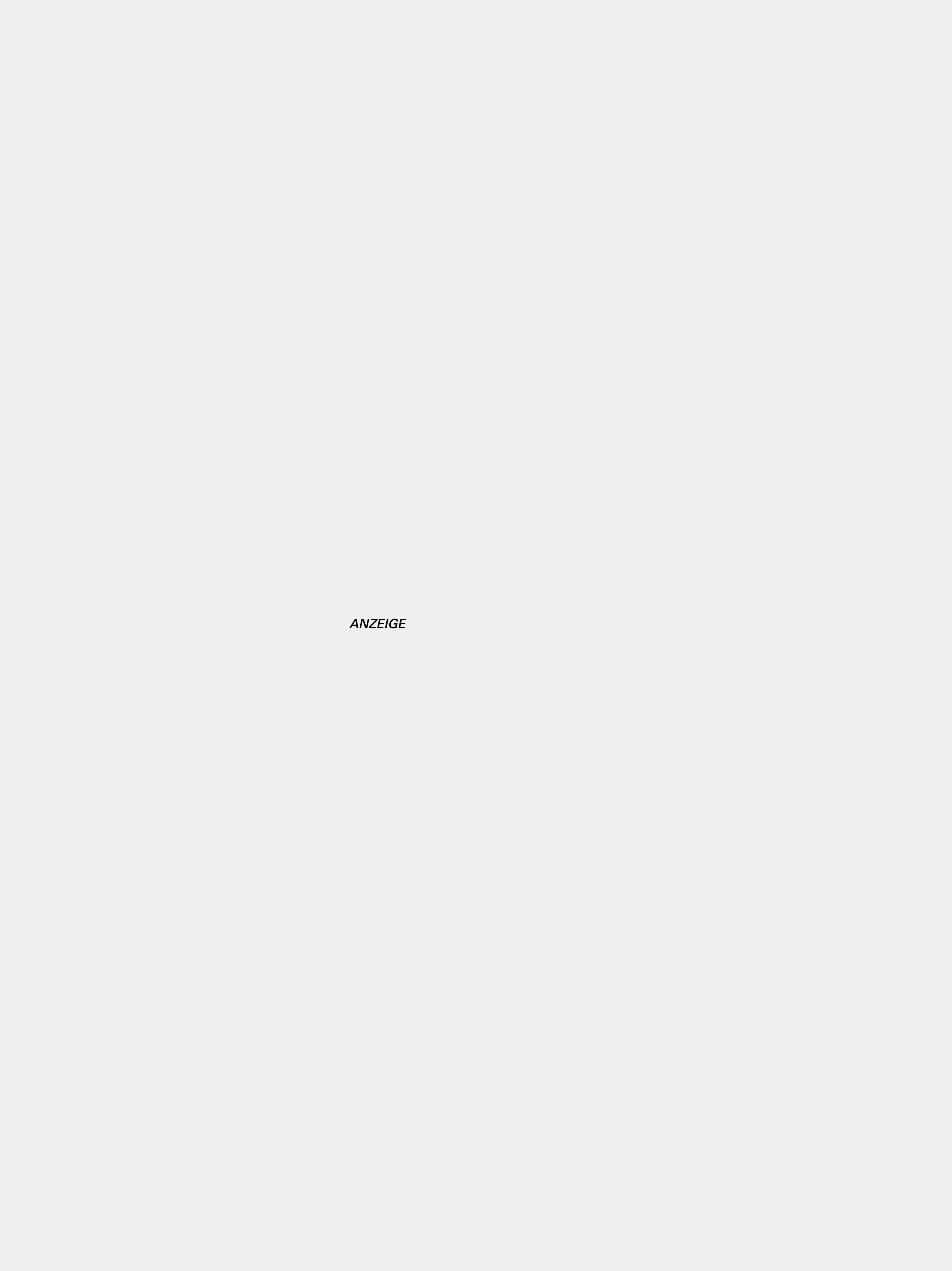
Höhenmessungen aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts – hier die Vorbereitung eines Ballonaufstiegs auf Island um 1944 – wurden kaum ausgewertet. Der Autor sammelte und digitalisierte einen großen Teil des auf viele Archive verstreuten Datenmaterials für die Zeit zwischen 1939 und 1944.

Die kürzlich publizierten Resultate bestätigen, dass es damals eine globale Klimaschwankung gab, die höhere Schichten der Atmosphäre einschloss und exakt mit dem El-Niño-Ereignis zusammenfiel *(Nature, Bd. 431, S. 971)*. Die Zirkulation in den unteren Luftschichten war dominiert durch ein kräftiges Aleutentief, das warme Luft nach Alaska steuerte, sowie ein schwaches Islandtief, das Vorstöße arktischer Kaltluft nach Mitteleuropa erlaubte.

Diese beiden wichtigen, quasistationären Drucksysteme sind eingebettet in die Westwindzirkulation der Mittelbreiten, welche in großräumigen, wellenartigen Schleifen mäandriert. Die rekonstruierten Druckfelder auf fünf bis acht Kilometer Höhe zeigen von 1940 bis 1942 eine auffällige Veränderung dieses Wellenmusters: Die Schleifen weiteten sich in nordsüdlicher Richtung stark aus.

Ebenso deutliche Abweichungen wie am Erdboden traten in der unteren Stratosphäre auf. Der winterliche Tiefdruckwirbel über dem Pol, das Hauptmerkmal der Zirkulation in dieser Höhe, war in den drei Wintern ungewöhnlich schwach ausgeprägt. Entsprechend herrschten in der unteren Stratosphäre über der Arktis, dem nördlichen Eurasien und dem ▷


ANZEIGE


ANZEIGE

Nordpazifik anomal hohe Temperaturen. Wie die Analyse einzelner Ballonaufstiege zusammen mit Rekonstruktionen und Ozondaten nahe legt, gab es in jedem der drei Winter mindestens ein so genanntes »Major Midwinter Warming«: eine explosionsartige Erwärmung der polaren Stratosphäre, verbunden mit einem Kollaps des Wirbels. Normalerweise findet nur jeden zweiten bis dritten Winter ein solches klimatologisch bedeutendes Ereignis statt.

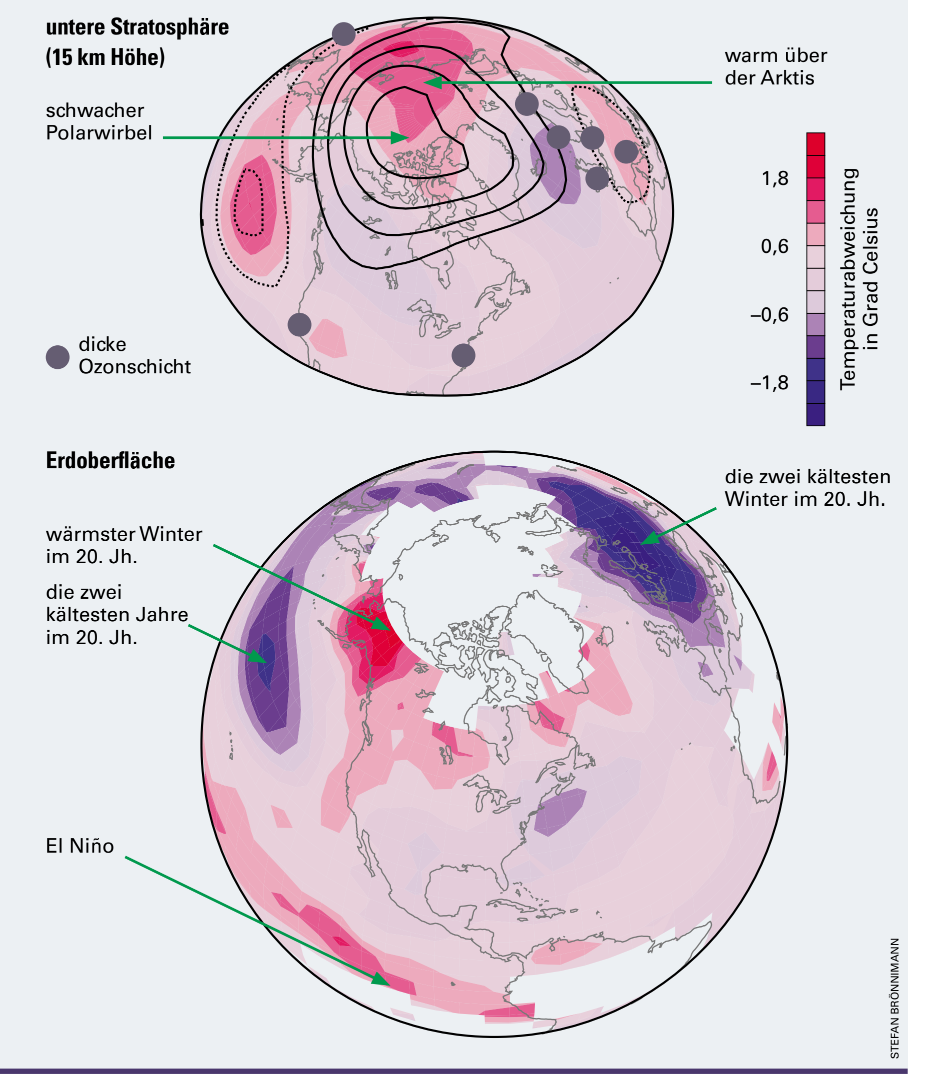
Die gefundenen Merkmale passen gut zueinander und lassen sich im Prinzip alle mit dem Auftreten von El Niño in Verbindung bringen. Dabei ergibt sich eine plausible Ereigniskette: El Niño beeinflusst die atmosphärische Zirkulation über dem Nordpazifik, verzerrt die dort liegende quasistationäre Welle und begünstigt dadurch ein starkes Aleutentief. Die Wellenstörung breitet sich dann stromabwärts nach Europa aus und schwächt dort das Islandtief sowie den eng mit ihm verknüpften Polarwirbel in der Stratosphäre. Dort entsteht infolgedessen eine Zirkulation, die ozonreiche Luft aus den Tropen heranführt – einer der Gründe für die dicke Ozonschicht – und eine Erwärmung hoch über der Arktis verursacht. Dies äußert sich in häufigen »Major Midwinter Warmings«, die stets durch Wellenstörungen verursacht werden.

Diese vermutete Ereigniskette überprüften meine Mitarbeiter und ich anhand der Ergebnisse einer Simulation, die das amerikanische National Center for Atmospheric Research zur Verfügung stellte. Dort hatten Wissenschaftler das Computermodell CCSM-2.0, das aus den miteinander gekoppelten Modulen Ozean, Atmosphäre, Eis und Landoberfläche besteht, ohne spezifische Vorgaben frei laufen und 650 Jahre irdisches Klimageschehen berechnen lassen. Dabei produzierte das Modell seine eigene Klimavariabilität, die sich zwar nicht bestimmten Jahren im realen Klima zuordnen lässt, aber im statistischen Sinn realistisch ist. So erzeugte es alle paar Jahre ein El-Niño-Phänomen, darunter auch gelegentlich ein so starkes und lang anhaltendes wie das von 1939 bis 1942.

Diese simulierten starken Ereignisse stimmten außerordentlich gut mit den Messungen und Rekonstruktionen der frühen 1940er Jahre überein. Das gilt nicht nur für das Temperatur- und Druckmuster an der Erdoberfläche, sondern auch für die Situation in der Stratosphäre. Das Modell bestätigt also, dass El Niño im Stande ist, die Wellenstruktur der Westwinde in den nördlichen Mittelbreiten zu verändern und über die geschilderte Wirkungskette die arktische Stratosphäre und das Klima in Europa zu beeinflussen.

Weltweite Klimaschwankung

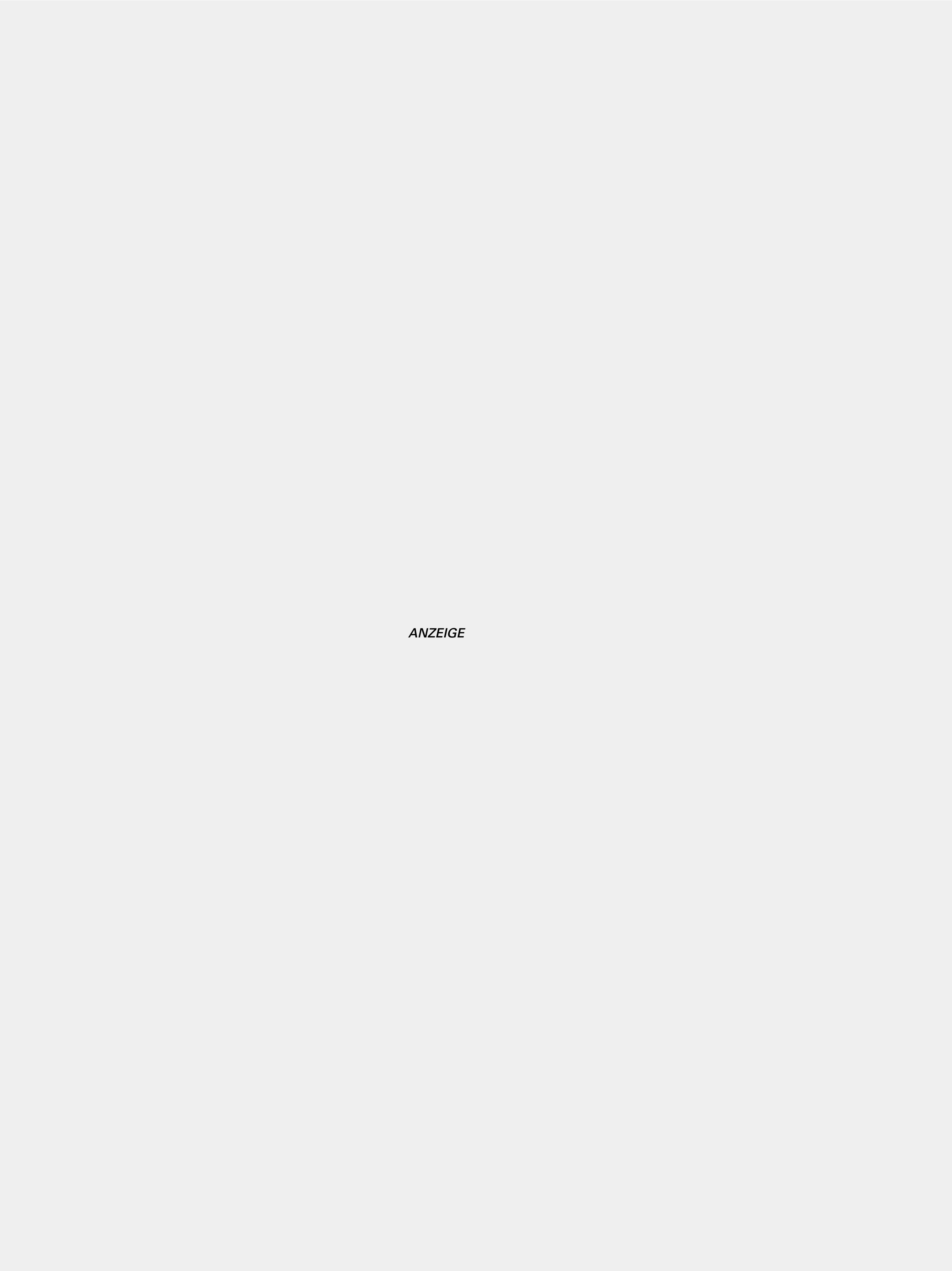
Aus den alten meteorologischen Messdaten konnte der Autor die atmosphärischen Verhältnisse auf der Nordhalbkugel zu Beginn der 1940er Jahre rekonstruieren. Dargestellt sind hier die Temperatur- und Druckabweichungen gegenüber dem Durchschnittswert von 1961 bis 1990 für die untere Atmosphäre (unten) und die Stratosphäre (oben), gemittelt von Januar 1940 bis Februar 1942. Die Karten dokumentieren eine großräumige Klimaanomalie, verbunden mit einer ungewöhnlich dicken Ozonschicht.



Einzelfall oder Regel?

Lässt sich dieser Zusammenhang für Prognosen nutzen? Davon sind wir leider noch weit entfernt. Die Klimareihen der letzten sechzig Jahre zeigen zwar, dass mehrere El-Niño-Ereignisse ähnliche, wenngleich schwächere Auswirkungen hatten wie das am Anfang der 1940er Jahre. Am deutlichsten war der Zusammenhang 1986/87: Damals gab es einen sehr kalten Winter in Mittel- und Osteuropa, einen schwachen Polarwirbel und ein »Major Midwinter Warming«. Aber andere El-Niño-Ereignisse hatten nicht diese Auswirkungen.

Die Gründe sind zum Teil bekannt – so fiel das Phänomen mehrfach mit Vulkanausbrüchen zusammen, die ihrerseits das Klima beeinflussten und im Modell


ANZEIGE

▷ nicht berücksichtigt sind. Es muss aber auch weitere, noch nicht bekannte Gründe geben.

Dass das besonders starke El-Niño-Phänomen zwischen 1939 und 1942 die damaligen Klimaextreme auslöste, scheint jedoch sicher. Ähnliche Verhältnisse können sich jederzeit wiederholen, und damit auch die strengen Winter in Europa. Der nächste starke El Niño kommt bestimmt. Bis dahin wissen wir vielleicht besser, unter welchen Umständen sich die Witterungsverhältnisse im tropischen Pazifik bis nach Europa auswirken.

Stefan Brönnimann ist promovierter Geograf und Professor an der ETH Zürich.

VERHALTENSÖKOLOGIE

Arme Chefs

In sozialen Tierverbänden können sich ranghohe Mitglieder meist erfolgreicher fortpflanzen. Eine überraschende Ausnahme von dieser Regel wurde nun bei Dohlen entdeckt.

Von Martin Fellendorf

Es ist eine zentrale Aussage der Verhaltensbiologie: Bemühen sich Tiere um eine dominante Position in ihrem Sozialverband, versuchen sie damit letztlich, ihre Fortpflanzungschancen zu verbessern. Eine Stellung weit oben in der Rangordnung erhöht gemeinhin den Paarungserfolg und die Möglichkeit, den Nachwuchs vor den Unbilden des Lebens abzuschirmen. Zugleich verschafft sie bevorrechtigten Zugang zu Ressourcen wie Brutplätzen oder Nahrung.

Eine soziale Vormachtstellung ist allerdings nicht umsonst zu haben: Sie zu erringen und zu verteidigen kostet Zeit und Energie und birgt meist ein hohes Verletzungsrisiko. Wenn der Aufwand dafür die Vorteile einer dominanten Position übersteigt, sollte es vernünftiger sein, sich mit einem niederen Rang zufrieden zu geben.

Einen solchen Fall haben nun Simon Verhulst und H. Martijn Salomons von der Universität Groningen bei einer alteingessenen Brutkolonie von Dohlen *(Corvus monedula)* im niederländischen Haren dokumentiert *(Animal Behaviour, Bd. 68, S. 777)*. Dohlen sind die kleinsten heimischen Rabenvögel und leben in strikt monogamer Dauerehe. Ihre Treue ist durch Vaterschaftsanalysen zweifelsfrei belegt. Die geselligen Vögel verbringen auch außerhalb der Brutperiode einen Großteil ihrer Zeit in Gruppen mit strenger linearer Rangordnung. Der Status ist dabei unabhängig von der Körpergröße. Die einmal etablierte Hierarchie bleibt in der Regel über Jahre bestehen.

Unverpaarte junge Weibchen stehen immer ganz unten auf der sozialen Leiter. Erst durch die Verbindung mit einem Männchen rückt die Braut in den Rang ihres Bräutigams auf – und zwar umgehend. Auseinandersetzungen mit anderen Koloniemitgliedern gewinnt sie dann in Anwesenheit des Partners fast immer, auch ohne dass dieser unterstützend eingreift. Den umgekehrten Fall gibt es nicht: Kein Dohlenmann erklimmt die soziale Leiter durch Heirat.

Erstaunlicherweise fanden die Groninger Zoologen nun heraus, dass die dominanten Vögel der von ihnen untersuchten Brutkolonie weniger Nachkommen produzierten als Paare auf tieferen Stufen der Hierarchie – so zogen die fünf Männchen mit dem höchsten Rang im Durchschnitt nicht einmal halb so viele Jungvögel groß wie die fünf mit dem niedrigsten. Zudem überlebten die Nachkommen sozial hoch stehender Paare seltener. Bei genauerer Betrachtung zeigte sich, dass die Weibchen dominanter Männchen in vergleichsweise schlechter Verfassung waren und kleinere Eier legten. Daraus schlüpften dann kleinere und leichtere Küken, die schon in der Nestlingszeit häufiger starben.

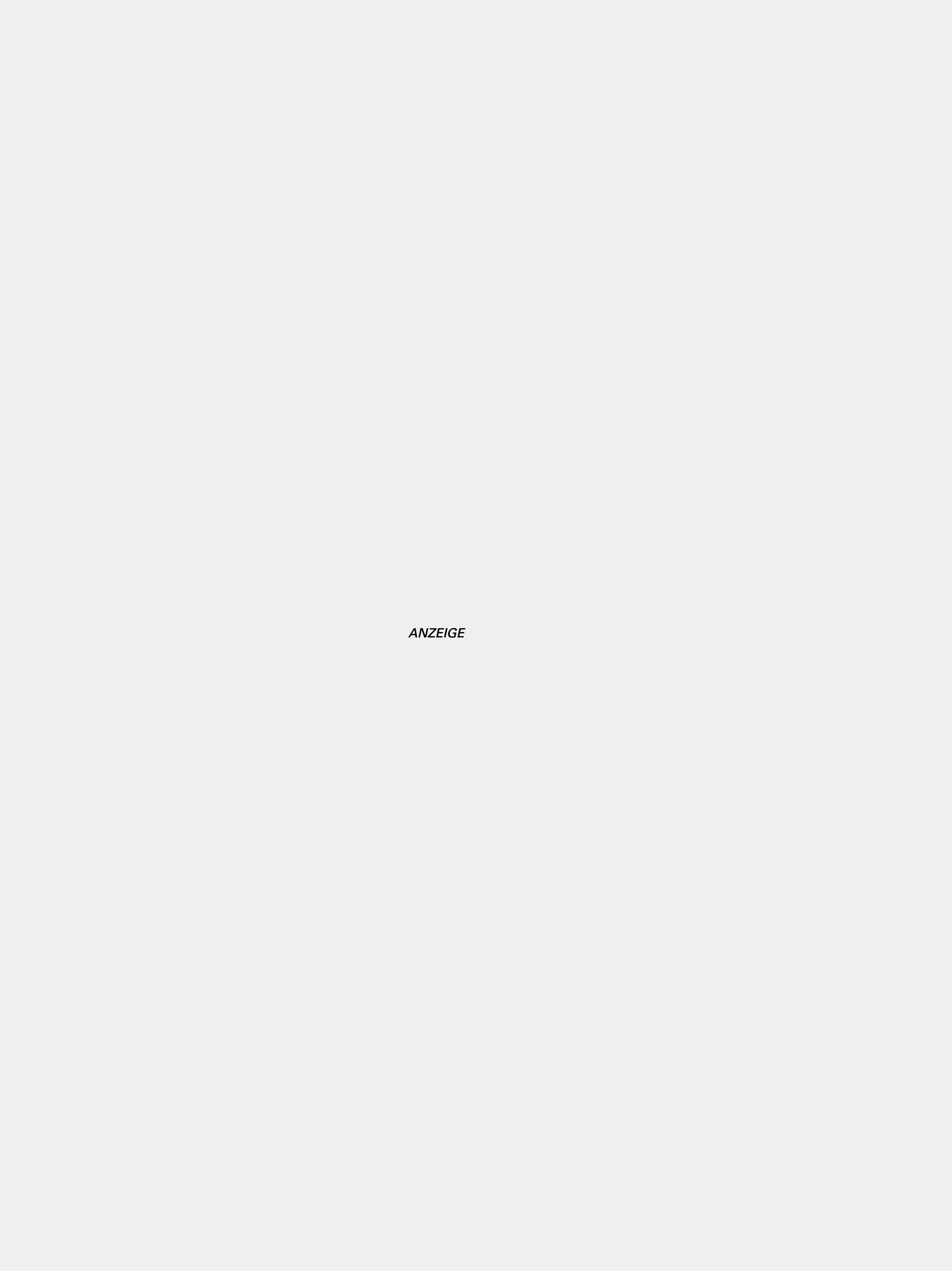
Dauerstress in übervölkerter Kolonie

Wie lassen sich diese Befunde deuten? Einen entscheidenden Hinweis lieferte der Vergleich mit früheren Untersuchungsergebnissen an einer britischen Dohlenkolonie. Dort hatte sich – bei gleichen Eckdaten wie der Anzahl der Brutpaare oder dem durchschnittlichen Bruterfolg – der erwartete positive Effekt der Dominanz auf die Anzahl der Nachkommen belegen lassen. Worin bestand also der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Kolonien?

Als mutmaßlich ausschlaggebender Faktor erwies sich der Abstand der Nester. Während er in Großbritannien etwa acht Meter betrug, lagen die Nisthöhlen der niederländischen Tiere nur anderthalb bis drei Meter auseinander. Nun ist bekannt, dass enge Nachbarschaft mehr aggressive Auseinandersetzungen mit sich bringt. Davon sind vor allem die ranghohen Tiere betroffen. Durch den Dauerstress steigt ihr Testosteron-Spiegel. Das männliche Sexualhormon unterdrückt aber die elterliche Fürsorge, was sicherlich zu dem geringen Fortpflanzungserfolg beiträgt. Zudem erhöht ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ **Streitereien schmälern in einer übervölkerten Dohlenkolonie speziell bei ranghohen Tieren den Bruterfolg.**


ANZEIGE

Testosteron die Streitlust. Dadurch verhielten sich dominante Männchen, wie die niederländischen Forscher feststellten, deutlich aggressiver gegen ihre Partnerin als ihre rangniederen Geschlechtsgenossen.

Daraus scheinen die fittesten Dohlenweibchen eine radikale Konsequenz zu ziehen. Um dem zermürbenden Alltagsgeplänkel und dem aufreibenden Stress zu entfliehen, der bei drangvoller Enge mit einer hohen sozialen Stellung verbunden ist, tun sie sich lieber mit einem verträglicheren untergeordneten Männchen zusammen. Für die Bosse bleiben dann nur noch Weibchen in schlechterer körperlicher Verfassung. Dies dürfte ein weiterer Grund für ihren niedrigeren Fortpflanzungserfolg sein.

Sinnloses Streben nach hohem Rang

So plausibel diese Deutung scheint – der letzte Beweis steht noch aus. Denn bisher haben die niederländischen Forscher die Kondition der Dohlenfräulein vor der Hochzeit nicht geklärt. Eine Präferenz von Weibchen für rangniedere Männchen ist indes nicht ungewöhnlich. Von der Feldgrille bis zum Fasan reichen die Beispiele von Arten, bei denen die jungen Damen ihre Gunst nicht unbedingt den Bossen gewähren. Für weibliche Wachteln ließ sich jüngst ein solches Verhalten bei der Partnerwahl experimentell klar belegen *(Animal Behaviour, Bd. 66, S. 399)*.

Damit stellt sich die entscheidende Frage, warum die Männchen nach sozialer Vormachtstellung streben, wenn diese sich nicht in einem messbaren Fortpflanzungserfolg niederschlägt? Bei der niederländischen Dohlenkolonie könnte es an mangelnder Anpassungsfähigkeit gegenüber einer extremen Umweltsituation liegen: Die Männchen sind genetisch so darauf programmiert, einen hohen Rang zu erkämpfen, dass sie es auch dann noch tun, wenn es keinen reproduktiven Vorteil mehr bringt. Trägt der Umstand, dass der Reproduktionserfolg auf den verschiedenen Stufen der sozialen Leiter von den Umweltbedingungen abhängt, vielleicht zur Aufrechterhaltung unterschiedlicher Genotypen bei? Gut möglich; denn letztlich machen die Unterschiede das Wesen der Welt aus …

Martin Fellendorf promoviert an der Universität Tübingen in Populationsökologie.

Springers EINWÜRFE

von Michael Springer

Das Material ist die Maschine

Haben künftige Motoren metallische Muskeln?

Will man wissen, wie die Maschinen der Zukunft aussehen werden, empfiehlt sich ein Blick in die Vergangenheit.

Am Beginn der Industrialisierung standen gewaltige Kessel, über denen Kohle Wasser zum Kochen brachte. Der erzeugte Dampf setzte eiserne Kolben und Schwungräder in Bewegung. Die trieben über Riemen und Zahnräder andere Maschinen an – und bald die Fließbänder, an denen die Fabrikarbeiter in strengem Zeittakt mechanische Bewegungen ausführten, als wären sie auch nur Maschinenteile.

Diese Arbeitswelt, in Charlie Chaplins Filmklassiker »Moderne Zeiten« verewigt, mutet uns, obwohl nur hundert Jahre alt, heute schon an wie eine urtümliche Kohle- und Eisenzeit. In modernen Fabriken geht es leiser zu, wenige Menschen beaufsichtigen über Bildschirme das Zusammenspiel halbautomatischer Produktionsabläufe. An modernen Auto-Montagebändern sind flinke Roboterarme bereits ganz unter sich.

Wenn Technikvisionäre diesen Trend bis zum denkbaren Ende extrapolieren, landen sie Hals über Kopf gleich bei der Nanotechnologie: Intelligente Maschinen, kaum größer als Moleküle, bauen aus Atomen alles Mögliche zusammen – sogar sich selbst. Das gibt Anlass zu rosaroten Utopien (nur noch Freizeit!) oder tiefschwarzen Kassandra-Szenarien (Nanoschwärme greifen an!) bis hin zur Frage, ob die Menschheit einst zu Gunsten einer überlegenen, durch Techno-Evolution entstandenen Spezies selbstreproduzierender Nanoroboter abdanken wird.

Bei diesem Salto mortale in die Spekulation wird übersehen, dass eine viel näher liegende Entwicklungsstufe noch immer auf sich warten lässt: Miniaturisierung der typischen Maschine auf Submillimeterniveau. Unter dem Stichwort Mikromechanik werden chemisch oder lithografisch fabrizierte Maschinchen, die ihre Struktur erst unter dem Licht- oder gar Elektronenmikroskop preisgeben, seit Jahrzehnten angekündigt, haben bisher aber bestenfalls Nischen besetzt – mikroskopische Sensoren und Aktoren messen Kenngrößen und bewegen bei Energiezufuhr Hebel und Räder wie ihre makroskopischen Verwandten.

Neuen Auftrieb scheint die Mikromechanik nun durch die Verschmelzung mit einem anderen Hoffnungsträger zu bekommen: »martensitischen« Legierungen, die unter Wärmezufuhr ihre Kristallstruktur ändern und bei Abkühlung wieder die alte Gestalt annehmen *(Science, 7.1.2005, S. 53)*. Warum mikromechanische Maschinen nicht gleich aus solchen Materialien mit Formgedächtnis fertigen?

Nach diesem Prinzip sind bereits Mikropumpen, -ventile und -manipulatoren fast bis zur Marktreife gediehen. Dabei werden biegsame Substrate mit dünnen martensitischen Schichten überzogen. Bei Wärmezufuhr, etwa durch Stromfluss, können sich diese Häutchen krümmen und Hohlräume oder feine Tunnel pulsieren lassen. So entstehen Materialien, die zugleich Maschinen sind. Sie können etwa winzige Tröpfchen von Reagenzien auf chipgroßen chemischen Labors bewegen oder als mechanische Aktoren mit hohem Wirkungsgrad arbeiten.

Solche Geräte mit einer Art elektromechanisch-anorganischer Muskelkraft wären ideal für Einsätze in jeder kleinräumigen, energiearmen Umgebung: beispielsweise bei medizinischen Operationen im Innern eines lebenden Organismus oder bei Fernerkundungsmissionen mit Weltraumsonden. Doch sie müssen nicht auf derart spezielle Anwendungen beschränkt bleiben. Auf engstem Raum mit möglichst wenig Energie sollen schließlich auch die Prozesse in künftigen automatisierten Fabriken ablaufen.



Ein patenter Experte dritter Klasse

Im April 2005 jährt sich der Todestag Albert Einsteins zum 50. Mal. Ein weiterer Anlass des Gedenkens: Vor hundert Jahren, im »Wunderjahr« 1905, begründeten mehrere bahnbrechende Arbeiten den Ruhm des bekanntesten Physikers des 20. Jahrhunderts – die erste vollendete er im März.

Von Georg Wolschin

Nach dem Studium an der ETH Zürich fand Albert Einstein (1879–1955) eine Anstellung am Patentamt in Bern – als so genannter Experte dritter Klasse begann er dort 1902 mit einem Jahresgehalt von 3500 Schweizer Franken. Nach zwei Jahren Probezeit wurde die Position in eine Dauerstellung umgewandelt. Am 1. April 1906 folgte schließlich die Beförderung zum Experten zweiter Klasse.

In jener Zeit beschäftigte sich Einstein intensiv mit Thermodynamik und statistischer Mechanik. Nachdem er in den »Annalen der Physik« bereits vier Artikel zu Problemen aus diesen Zweigen der theoretischen Physik veröffentlicht hatte, reichte er bei derselben Zeitschrift im Jahr 1905 gleich fünf seiner wichtigsten wissenschaftlichen Arbeiten ein.

Im März jenes Jahres beendete Einstein das Manuskript über die Lichtquantenhypothese, die wesentlich zu den Grundlagen der Quantenmechanik beitrug und für die er 1921 den Physik-Nobelpreis erhielt. In dieser Arbeit formulierte er den Gedanken, dass Strahlung – die bislang als Wellenerscheinung angesehen wurde – sich so verhalten kann, als bestünde sie aus materiellen Punktteilchen, deren Energie proportional zur Frequenz der Strahlung ist. Damit ließ sich der Fotoeffekt erklären, den Heinrich Hertz 1887 experimentell entdeckt hatte.

Im Alleingang die Physik reformiert

Im Mai und im Dezember 1905 folgten zwei Schriften über die Brown'sche Bewegung, die von grundlegender Bedeutung für die statistische Physik sind. Einstein führte darin die Zufallsbewegungen, die makroskopische Partikel in einer Flüssigkeit vollführen, auf Stöße durch die Flüssigkeitsmoleküle zurück. Benannt ist diese Erscheinung nach dem schottischen Botaniker Robert Brown, dem 1827 bei mikroskopischen Untersuchungen aufgefallen war, dass Blütenpollen an der Oberfläche eines Wassertropfens Zitterbewegungen vollführen.

Zwischen diesen beiden Artikeln reichte Einstein zwei Schriften zur Speziellen Relativitätstheorie bei den »Annalen« ein: Im Juni eine »Zur Elektrodynamik bewegter Körper«, im September diejenige mit dem Titel »Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?«. Diese zweite Schrift erweitert die Erkenntnisse zur speziellen Relativität ganz wesentlich um die berühmte Formel $E = mc^2$: Die Masse m eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt E und mit diesem durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c verbunden – eine weltbewegende, damals völlig neue Erkenntnis, die in den Annalen auf nur drei Druckseiten präsentiert wurde, und die Einstein selbst kommentierte: »Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem Maße veränderlich ist

Serie

Interviews zum Einstein-Jahr 2005

› **Gespräch mit Karsten Danzmann, S. 28**

In den nächsten Monatsheften folgt je ein weiteres Interview zu den Folgen der Einstein'schen Arbeiten.



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Albert Einstein an seiner Arbeitsstelle im Patentamt in Bern, um 1906 aufgenommen

(z. B. bei den Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird.«

Einstein leistete also in einem einzigen Jahr quasi im Alleingang, ohne Anstellung an einer Universität oder einem Forschungsinstitut, fundamentale Beiträge zur statistischen Physik und zur Quantenmechanik, und er stellte die Relativitätstheorie auf. Die Quantentheorie führte er später fort: 1916 erschien zunächst eine Schrift zu den Koeffizienten der spontanen und induzierten Emission und Absorption, die grundlegend für die Physik des erst sehr viel später konstruierten Lasers war. Es folgte eine neue Ableitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes, mit dessen Formulierung Max Planck im Jahr 1900 die Quantenphysik begründet hatte, und schließlich – innerhalb von acht Monaten – eine Arbeit zu Energie und Impuls von Lichtquanten. In diese Zeit fallen auch die später immer wieder aufgegriffenen Äußerungen Einsteins über sein Unbehagen bezüglich der großen Rolle des Zufalls in der Quantenphysik (»Gott würfelt nicht«).

Die Relativitätstheorie entwickelte Einstein kontinuierlich weiter. Bereits 1907 fand er das Äquivalenzprinzip für gleichförmig beschleunigte mechanische Systeme, erweiterte es auf elektromagnetische Systeme, berechnete die Rotverschiebung im Gravitationsfeld und die Lichtablenkung an massereichen Körpern – die er aber noch für unbeobachtbar hielt. Im Jahr 1909 wurde er Außerordentlicher Professor an der Universität Zürich, zwei Jahre später Ordinarius in Prag. Dort erkannte er, dass die Lichtablenkung an der Sonne während einer totalen Sonnenfinsternis beobachtbar sein sollte.

Bald nach seiner Rückkehr nach Zürich im Oktober 1912 entwickelte er die Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie, einer neuartigen Theorie der Gravitation. Hatte Isaac Newton die Gravitation noch als instantane Fernwechselwirkung beschrieben, legte Einstein jetzt ein völlig neues Fundament, das die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit (die Lichtgeschwindigkeit) berücksichtigte und die Krümmung der Raumzeit durch Materie beschrieb.

In Göttinger Vorlesungen überzeugte er 1915 die Mathematiker David Hilbert und Felix Klein von seiner Theorie. Im Folgejahr ging seine grundlegende Arbeit dazu bei den »Annalen« ein. Wenig später entwarf er auf ihrer Basis seine erste Schrift über Gravitationswellen, nach denen Physiker heute mit riesigen Interferometern suchen.

Lichtablenkung bestätigt

Die Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie zur Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne wurden im Prinzip bereits 1919 bei Sonnenfinsternis-Expeditionen bestätigt – was Einsteins Weltruhm begründete. Sie wurden später – ab 1969 – mit viel höherer Genauigkeit durch Messungen der Ablenkung von Radiowellen von Quasaren im Gravitationsfeld der Sonne endgültig verifiziert. Zusammen mit anderen klassischen und modernen Präzisionstests – so der Periheldrehung des Planeten Merkur, der Periastron-Drehung in engen Neutronen-Doppelsternen oder der Rotverschiebung im Gravitationsfeld – lassen sie keinen Zweifel an der Gültigkeit der Theorie bestehen.

Gravitationswellen sollten der Theorie zufolge aus engen oder verschmelzenden Doppelsternsystemen, Paaren von Schwarzen Löchern oder Supernova-Explosionen von Sternen ausgesandt werden. Bis heute gibt es allerdings nur indirekte Anzeichen für die Emission dieser wellenartigen Erschütterung der Raumzeit: Enge Neutronen-Doppelsternsysteme verlieren durch Abstrahlen von Gravitationswellen Energie, was sich durch Verkürzen ihrer Umlaufperioden bemerkbar macht (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/1993, S. 21, 6/1996, S. 52, und 5/2004, S. 16).

Umso wichtiger wäre ein experimenteller Nachweis der Gravitationswellen durch die verschiedenen Detektoren, die in den letzten Jahren errichtet wurden oder noch im Bau sind: Geo 600 in der Nähe von Hannover, Virgo in Italien und Frankreich, Ligo in den USA und Tama in Japan. Die Messgenauigkeit soll in einigen Jahren durch ein ehrgeiziges Interferometerprojekt im Weltraum, Lisa, weiter erhöht werden. ▷

Interview

▷ **Im Gespräch beleuchtet Karsten Danzmann vom Albert-Einstein-Institut in Potsdam und Hannover, der Leiter des Geo-600-Experiments, die Entwicklung von Einsteins Arbeiten aus dem Jahr 1905 hin zu den heutigen Bemühungen, Gravitationswellen durch Laserinterferometrie nachzuweisen.**


Karsten Danzmann

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK

Spektrum der Wissenschaft: Herr Danzmann, wie würden Sie den Physiker Albert Einstein in zwei Sätzen skizzieren?

Karsten Danzmann: In der Öffentlichkeit ist Einstein ja vorwiegend für die Gleichung $E = mc^2$ bekannt, aber die wenigsten Menschen wissen, dass er auch auf anderen Gebieten fundamentale Beiträge geleistet hat. Seine Arbeiten zu den Grundlagen der Quantenmechanik sind vielleicht genauso wichtig wie die zur Relativitätstheorie, obwohl er selbst immer Probleme mit diesem Paradigmenwechsel in der Physik hatte – die Konsequenzen aus dem, was er selbst auf dem Gebiet angestoßen hatte, wollte er nie so recht akzeptieren.

Spektrum: Einsteins erste Publikation 1905 erklärte den Fotoeffekt. Was ist aus Ihrer Sicht die grundlegende Bedeutung dieser Arbeit für die Quantenmechanik?

Danzmann: Der Fotoeffekt ist ein Klassiker auf diesem Feld. Ich benutze ihn in Vorlesungen als eine der Säulen der Quantentheorie, weil er auf so wunderbar einfache und schöne Weise demonstriert, dass Licht nicht in kontinuierlichen Mengen zwischen dem Strahlungsfeld und Gegenständen ausgetauscht werden kann. Man braucht nur wenige simple Grundgedanken und einfache Mathematik, die jeder Fünftklässler beherrschen kann. Damit lässt sich sofort zeigen, dass das Herauslösen von Ladungen aus Oberflächen bei Bestrahlung mit Licht nur dann schlüssig zu erklären ist, wenn man annimmt, dass das Licht von den Atomen in der Oberfläche nicht in beliebigen Beträgen aufgenommen werden kann, sondern nur in ganzzahligen Vielfachen einer kleinsten Einheit. Diese kleinste Einheit bestimmt dann auch den Energieinhalt, der von der Farbe des Lichts abhängt. Beide Dinge sagen eindeutig, dass Licht in Quanten – den Photonen – daherkommt.

Spektrum: Elf Jahre später legte Einstein weitere Publikationen zur Quantentheorie vor. In einer behandelte er die spontane und induzierte Lichtemission. Welche Bedeutung kommt dieser Arbeit für die spätere Entwicklung des Lasers zu, den Sie ja auch in Ihren Experimenten zur Gravitationswellenforschung einsetzen?

Danzmann: Der Laser ist heute ein so selbstverständliches Werkzeug für uns alle geworden, dass wir gar nicht mehr darüber nachdenken, was eigentlich physikalisch in ihm vorgeht. Nachdem Einstein die Grundlagen gelegt hatte, hätte man den Laser eigentlich schon voraussagen können – wie er funktioniert, wie man ihn ungefähr bauen muss und welche Eigenschaften er haben sollte.

Einstein geht hier von ganz simplen Grundgedanken aus. Wenn man akzeptiert hat, dass Materie und Licht nur dadurch in Verbindung treten können, dass sie in Paketen Energie austauschen, die man Photonen nennt, dann ist die nächste Frage: Was sind denn die möglichen Elementarprozesse in dieser Wechselwirkung? Der Austausch muss in zwei Richtungen gehen: Atome müssen Licht aufnehmen können, also ein Photon absorbieren, und sie müssen auch Licht aussenden können, also ein Photon emittieren – denn Dinge leuchten ja offensichtlich.

Durch eine einfache Gleichgewichtsbetrachtung zwischen einem Strahlungsfeld und einem Atom konnte Einstein zeigen, dass dies allein inkonsistent ist und es deshalb noch einen dritten Prozess geben muss, den man später stimulierte Emission nannte. Sie wird dadurch ausgelöst, dass ein hereinkommendes Photon das Atom dazu anregt, ein identisches Photon auszusenden und so »kohärentes« Licht aufzubauen. Sobald man diesen Prozess hat, lässt er sich lawinenartig fortsetzen: Aus einem Photon werden zwei, aus zwei vier, und so fort. Das führt zu einem hochintensiven Lichtstrahl, wenn man nur genügend Atome im richtigen Zustand hinlegt und ihnen die Möglichkeit gibt, mit Licht zu interagieren. Im Grunde genommen ist also Einstein der Erfinder des Lasers.

Spektrum: Aber konkret schufen die Grundlagen des Lasers dann erst Wissenschaftler in den 1950/60er Jahren …

Danzmann: Ja. Die experimentelle Entwicklung folgte erst über vierzig Jahre später. Das ist übrigens bei der Gravitationswellenforschung ähnlich, die ebenfalls von Einstein begründet wurde. Die Gravitationswellen sagte er 1916 voraus, und erst jetzt versuchen wir und unsere Kollegen in anderen Ländern, diese Wellen direkt nachzuweisen. Wir greifen dabei auf den Laser zurück, ohne den wir diese Messungen gar nicht durchführen könnten.

Spektrum: Sie haben dazu das Experiment Geo 600 bei Hannover aufgebaut. Nach welchem Prinzip funktioniert dieser Gravitationswellendetektor?

Danzmann: Wir versuchen mit Geo 600 Gravitationswellen nachzuweisen, um etwas über die dunkle Seite des Universums zu lernen, die sich vorwiegend


W. BENGER / MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK, ZUSE-INSTITUT BERLIN

Die Kollision zweier Schwarzer Löcher – hier im Computer simuliert – sollte Gravitationswellen erzeugen, die die Raumzeit erschüttern.



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GRAVITATIONSPHYSIK

Die senkrecht zueinander stehenden Interferometerarme des Geo-600-Detektors bei Hannover sind 600 Meter lang.

durch Gravitation, also durch Schwerkrafteffekte, bemerkbar macht. Einstein hat ja in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie den Begriff der Schwerkraft auf eine neue Basis gestellt und uns gezeigt, dass »Schwerkraft« keine Kraft ist, sondern eine Eigenschaft des Raums: Jeder Körper dellt Raum und Zeit in seiner Umgebung leicht ein, und wenn die Körper sich bewegen, breiten die Dellen sich langsam in alle Richtungen aus – das ist ganz ähnlich wie bei einer seismischen Welle.

Diese Erschütterungen der Raumzeit wollen wir mit Hilfe eines Michelson-Interferometers nachweisen. Das ist ein im Prinzip recht einfaches Gebilde, das aus zwei senkrecht zueinander angeordneten Vakuumrohren besteht und in dem Laserstrahlen hin- und herlaufen. Indem wir die Laserstrahlen überlagern und uns das entstehende Interferenzmuster anschauen, können wir sehr präzise Änderungen in der Differenz zwischen den beiden Armlängen nachweisen. Solche relativen Längenänderungen sollten entstehen, wenn eine Delle in der Raumzeit vorbeiläuft und dabei den einen Arm leicht staucht, den anderen dehnt.

Spektrum: Wie stark hat man sich diesen Effekt vorzustellen?

Danzmann: Die relative Längenänderung ist in der Tat winzig – sie entspricht etwa einem Tausendstel des Durchmessers eines Protons. Um das überhaupt messen zu können, brauchen wir nicht nur eine außergewöhnliche Präzision in der Messtechnik, sondern wir müssen auch konsequent alle Störquellen kompensieren.

Spektrum: Wie ist der gegenwärtige Stand des Experiments?

Danzmann: Wir haben Geo 600 im Jahr 2001 in Betrieb genommen und 2002 mit Abstandsmessungen begonnen. Dabei haben wir die Empfindlichkeit sukzessive verbessert. Mit keinem Interferometer erreichen Sie von Anfang an die gewünschte Auflösung – Sie müssen sich schrittweise vorarbeiten. Wir haben die Empfindlichkeit jetzt um vier Größenordnungen erhöht und können nun daran gehen, ernsthafte Daten aufzunehmen.

Spektrum: Sind Sie gegenüber der Anlage Ligo in den USA, dessen Interferometerarme immerhin vier Kilometer lang sind, nicht etwas im Nachteil?

Danzmann: Rein von der Länge der Interferometerarme betrachtet, haben wir mit unseren 600 Metern gegenüber den 4000 Metern von Ligo eine geringere Empfindlichkeit. Diesen Nachteil gleichen wir mit unserer raffinierten Optik zum großen Teil wieder aus.

Spektrum: Arbeiten Sie mit den US-Kollegen zusammen?

Danzmann: Ja, die wissenschaftliche Fragestellung können wir nur in internationaler Zusammenarbeit behandeln, auch mit unseren französischen und italienischen Kollegen im Virgo-Projekt. Die Datenströme von Geo 600 und Ligo werden gemeinsam aufgezeichnet, sehen fast identisch aus, und sie werden gemeinsam ausgewertet. Und wir arbeiten daran, unsere hoch entwickelte optische Technik auch bei Ligo einzusetzen, um die Empfindlichkeit dort weiter zu verbessern.

Spektrum: Wie konkret ist das?

Danzmann: Die letzten drei Jahre wurde intensiv an »Advanced Ligo« gearbeitet – allerdings theoretisch. Das Design ist praktisch fertig, in Modellrechnungen geprüft, es kann nun installiert und erprobt werden. Das wird zunächst in Prototyp-Experimenten geschehen, dann aber auch direkt in Ligo. Das National Science Board in den USA hat die Pläne genehmigt, und damit ist es jetzt nur noch eine Frage der Zeit, wann das Geld ins Budget eingestellt wird.

Spektrum: Das geplante Weltrauminterferometer Lisa soll eine Armlänge von fünf Millionen Kilometern haben. Wann ist der Start dieses Experiments?

Danzmann: Wir müssen unterscheiden zwischen dem Start der Rakete und dem des Projekts. Der Raketenstart ist für 2013 geplant, hängt allerdings davon ab, ob die Vorläufermission Smart-2 zur Demonstration der Technologie gegen Ende 2008 oder spätestens in 2009 starten kann. Die erste Vorläufermission Smart-1 mit dem neuartigen Ionentriebwerk ist im November 2004 nach einjähriger Flugzeit am Mond angekommen und wir hoffen, dass Smart-2 genauso erfolgreich sein wird.

Spektrum: Und welchen Vorteil hat Lisa gegenüber Geo 600?

Danzmann: Mit Geo 600 wollen wir Gravitationswellen nachweisen, die aus der Verschmelzung von zwei stellaren Schwarzen Löchern oder von einem Schwarzen Loch und einem Neutronenstern stammen. Lisa wird auch Gravitationswellen mit sehr niedrigen Frequenzen registrieren, die wir mit Anlagen auf der Erde nicht messen können. Die wirklich tiefen Töne können wir nur im Weltraum hören. Je massereicher die Quellen sind, desto langsamer bewegen sie sich. Lisa sollte in der Lage sein, die Verschmelzung von extrem massereichen Schwarzen Löchern zu registrieren, wie sie in den Zentren von Galaxien vorkommen. Derartige Schwerkraftmonster haben das Millionenfache der Masse unserer Sonne. ◁



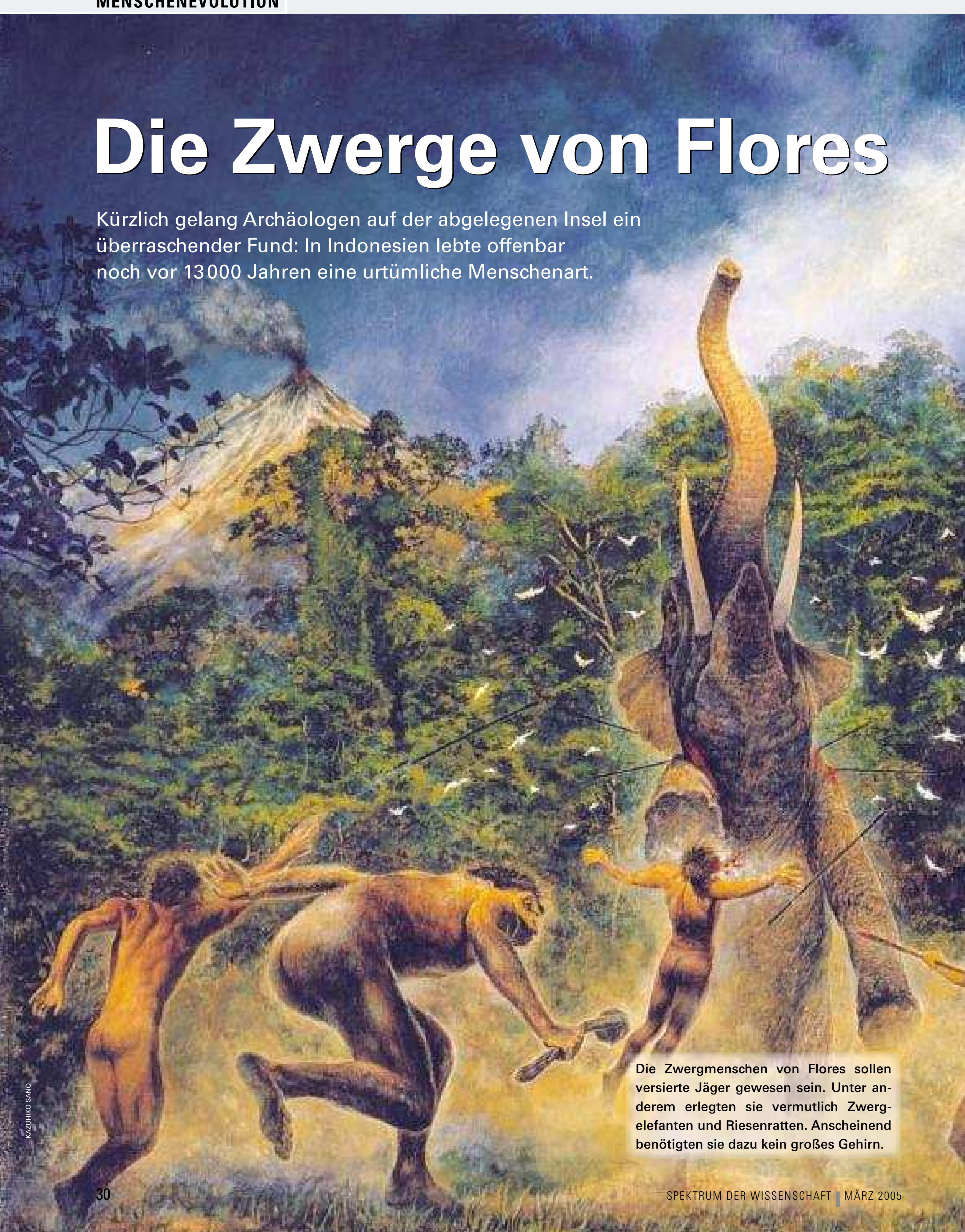
Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg Physik und ist Wissenschaftsjournalist.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Die Zwerge von Flores

Kürzlich gelang Archäologen auf der abgelegenen Insel ein überraschender Fund: In Indonesien lebte offenbar noch vor 13000 Jahren eine urtümliche Menschenart.



KAZUHIKO SANO

Die Zwergmenschen von Flores sollen versierte Jäger gewesen sein. Unter anderem erlegten sie vermutlich Zwergelefanten und Riesenratten. Anscheinend benötigten sie dazu kein großes Gehirn.

Von Kate Wong

Die heutigen Ureinwohner von Flores, einer der östlichen indonesischen Inseln, erzählen Geschichten von Ebu Gogo, der »Großmutter mit dem unersättlichen Appetit«. Das gnomenhafte Fabelwesen trottet, komische Laute murmelnd, auf zwei Beinen durch den Wald. Bisher glaubten Anthropologen, die Fantasie der Eingeborenen habe sich an Erlebnissen mit Makaken, also Affen, entzündet.

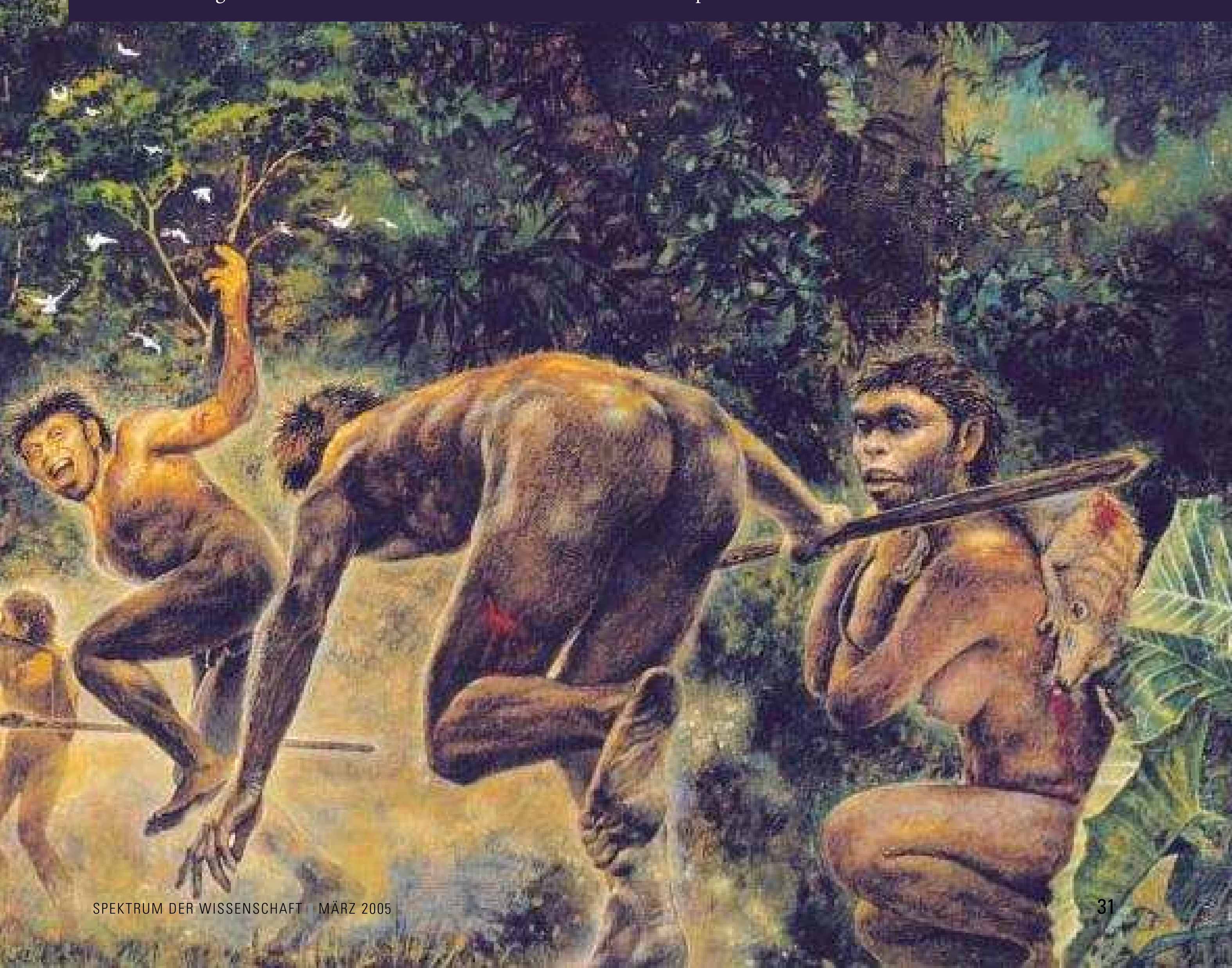
Nun erscheint eine andere Erklärung möglich. In der Wissenschaftszeitschrift »Nature« beschrieben australische und indonesische Forscher im Oktober 2004 Funde aus einer Höhle der Insel: Überreste von besonders kleinen Menschen, darunter ein Skelett, sowie Werkzeuge und Tierknochen.

In mehrfacher Hinsicht fügt sich die Entdeckung nicht in die bisherigen Modelle der Menschenevolution (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 14). Mit ungefähr einem Meter Wuchshöhe waren diese Geschöpfe für einen *Homo* Zwerge, allenfalls so groß wie Australopithecinen – jene Vormenschen, die vor einigen Millionen Jahren in Afrika lebten.

Dazu passt aber nicht das geringe Alter. Für das Skelett ergaben verschiedene Messungen rund 18000 Jahre. Neu hinzugekommene Knochenreste lassen die Entdecker annehmen, dass diese Menschenform über einen längeren Zeitraum und noch bis vor 13000 Jahren existierte. Dabei galt in der Paläoanthropologie längst als sicher, dass der *Homo sapiens* die Erde seit wenigstens 25000 Jahren allein beherrscht, nachdem in den letzten europäischen Refugien der Neandertaler und in Südostasien die letzten Vertreter des *Homo erectus* verschwunden waren.

Rätsel gibt zudem das für einen *Homo* selbst dieser Größe viel zu kleine Gehirn des Floresmenschen auf. Trotzdem scheinen jene Inselbewohner pfiffig genug gewesen zu sein, um allerlei ausgefeiltes Gerät anzufertigen und zum Beispiel Elefanten zu erlegen.

Schon einmal hatten frühzeitliche menschliche Artefakte auf Flores bei vielen Experten zunächst Unglauben hervorgerufen: Eine Gruppe von Archäologen um Michael J. Morwood von der University of New England in Armidale (New South Wales, Australien) gab 1998 bekannt, in der Soa-Bay der Insel seien grob behauene, 840000 Jahre alte Steinwerkzeuge gefunden worden. Menschliche Fossilien entdeckten die Forscher nicht bei den ▷



▷ Geräten. Darum schrieben sie die Artefakte dem *Homo erectus* zu, der Menschenform, die nach allem Wissen damals in Südostasien lebte.

Die Vorgeschichtler erklärten den Fund damit, dass der *Homo erectus* irgendwie von Java aus nach Flores gelangt sein muss. Denn javanische Fossilien dieses Frühmenschen wurden schon vor Langem entdeckt. Nur besaß der *Homo erectus*, soweit Fundstellen das anzeigen, wohl kaum das kulturelle Niveau, um meerestaugliche Fahrzeuge bauen zu können. Als die ersten Bootsbauer jener Region gelten bisher Vertreter von *Homo sapiens*, die etwa vor 60 000 bis 40 000 Jahren Australien erreichten.

Erst ein menschlicher Zahn, dann ein Skelett

Mehr Aufschluss über die frühe Besiedlung von Flores erhofften sich Morwood und sein Kollege Radien P. Soejono vom indonesischen Zentrum für Archäologie in Jakarta von Ausgrabungen in einer geräumigen Kalksteinhöhle, die im westlichen Teil der Insel liegt. Dort, in der Liang-Bua-Höhle, graben indonesische Archäologen mit Unterbrechungen seit etwa dreißig Jahren, bisher allerdings nur in jüngeren Schichten. Als Morwood und Soejeno im Juli 2001 am selben Ort zu forschen begannen, planten sie, bis auf den anstehenden Fels vorzustoßen.

Viel eher als erwartet stießen sie auf Mengen von Steingerät sowie auf Elefantenknochen. Die Rüsseltiere gehörten zu einer Zwergform der ausgestorbenen Gattung *Stegodon*. Kurz vor dem Abschluss der dritten Grabungssaison kam dann endlich ein menschlicher Vorbackenzahn zum Vorschein. Hiervon nahm Morwood einen Abguss nach Armidale mit, um ihn dem Paläoanthropologen Peter Brown zu zeigen. »Das Fundstück erinnerte ganz klar an einen menschlichen Zahn, aber eindeutig stammte der nicht von einem modernen *Homo*«, erinnert sich dieser. Als Morwood eine Woche später, es war im September 2003, die Nachricht erreichte, in der Liang-Bua-Höhle habe man ein menschlich wirkendes Skelett gefunden, bestiegen die beiden Forscher die nächste Maschine nach Jakarta.

Wohl niemand hatte mit einer solchen Entdeckung gerechnet. Abgesehen davon, dass die Armknochen zunächst fehlten, war das Skelett ziemlich vollständig. Nach dem Becken und dem Gebiss zu urteilen, ging dieses Geschöpf aufrecht und war erwachsen. Nach Ansicht der Forscher handelte es sich um eine Frau.

Dieses Wesen hatte aber nur die Größe eines heutigen dreijährigen Kindes. Dabei besaß es das Gehirnvolumen der kleinhirnigsten bekannten Australopithecinen. An afrikanische Vormenschen erinnern noch einige andere primitive Merkmale. So ist das Becken recht breit und der Oberschenkelhals ziemlich lang gebildet. In manch anderer Hinsicht wirken die Knochen aber durchaus menschenähnlich. Die kleinen Zähne, die schmale Nase, die Form des Schädels und die Dicke der Schädelknochen – das alles passt durchaus zu unserer eigenen Gattung *Homo*.

Das Skelett des zwergenhaften Geschöpfs erhielt die Katalogbezeichnung LB1. Die Finder nennen es, nach Tolkiens Geschichten, lieber Hobbit, manche auch Gogo. In den folgenden Monaten untersuchte Brown die Überreste gründlich. Besonders die Einordnung in die Hominidensystematik fiel den Forschern nicht leicht. Zunächst wollte Brown den Fund einer neuen Gattung zuweisen, weil einige Merkmale an frühe Hominidenarten im Umkreis der Australopithecinen erinnern. Doch schließlich blieb man bei der Gattung *Homo*, weil die Ähnlichkeiten zu überwiegen scheinen.

Nimmt man allein das Alter des Skeletts, etwa 18 000 Jahre, würde man an eine Zwergform von *Homo sapiens* denken. Der Floresmensch passt aber durchaus nicht zu heutigen kleinwüchsigen Menschengruppen, etwa den Pygmäen, und er ähnelte auch nicht anderen heutigen Menschen, die krankheitsbedingt im Wachstum zurückbleiben. Pygmäen beispielsweise haben trotz der kleinen Gestalt ein großes Gehirn, denn erst in der Pubertät, wenn das Gehirn bereits seine endgültige Größe erreicht hat, verzögert sich ihr Körperwachstum.

Zwar kommt es auf Grund von genetischen Defekten vor, dass jemand klein bleibt und zugleich das Gehirn kaum noch wächst. Doch wie Brown betont, gehen damit weitere abnorme Merkmale einher, die beim Floresskelett nicht vor-


PORTIA SLOAN

IN KÜRZE

▶ Möglicherweise war der moderne Mensch, also der *Homo sapiens*, in den letzten 25 000 Jahren gar nicht die einzige **überlebende Menschenart**. Ein urtümlicher Gnom scheint bis vor 13 000 Jahren auf der indonesischen Insel Flores gehaust zu haben. Forscher fanden dort kürzlich ein Skelett sowie Knochenreste mehrerer Individuen.

▶ Obwohl der **Floresmensch** mit einem besonders kleinen Gehirn ausgestattet war, werden ihm die am Fundort entdeckten **hoch entwickelten Steinwerkzeuge** zugeschrieben. Erst weitere Grabungen und Analysen werden sicherstellen, ob er dessen fähig war und ob er tatsächlich eine **neue Menschenart** repräsentiert.

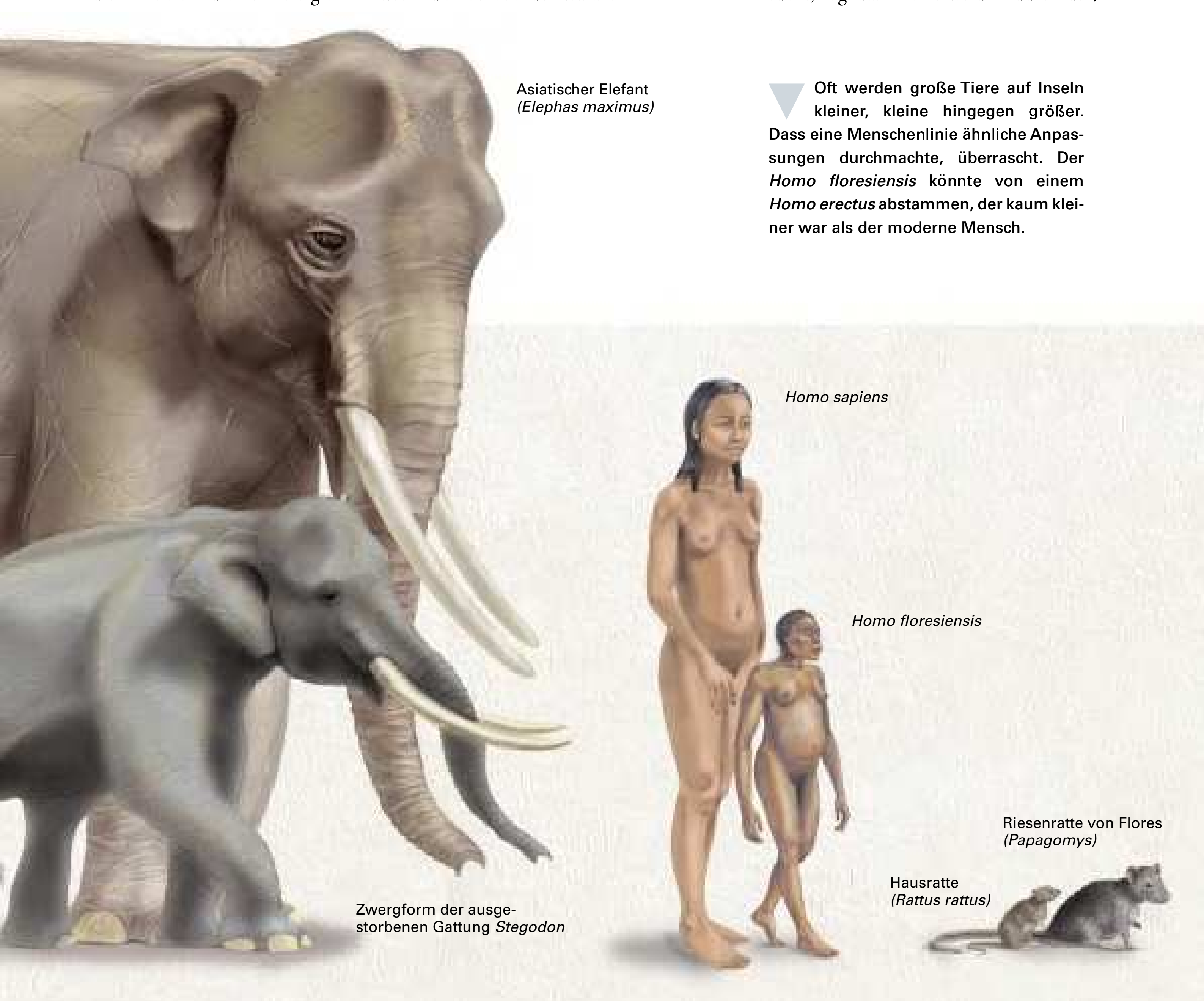
handen sind. Überdies würden Betroffene selten das Erwachsenenalter erreichen. Der indonesische Zwergmensch zeige zudem verschiedene Besonderheiten, die noch bei keinem krankhaft kleinwüchsigen *Homo sapiens* beschrieben seien und durchaus archaisch erschienen.

Noch am meisten ähnele die Inselfrau einem zu klein geratenen *Homo erectus*. In ihrem Fachartikel klassifizieren die Forscher das Skelett LB1, den einzelnen Zahn sowie einen menschlichen Armknochen, der in etwas älteren Schichten lag, dennoch als eine neue Menschenart, die sie *Homo floresiensis* nennen. Nach ihrer Ansicht handelt es sich um einen Abkömmling von *Homo erectus*, den es nach Flores verschlug. In der Isolation auf der Insel entwickelte die Linie sich zu einer Zwergform – was zumindest für zuvor große Tiere nicht ungewöhnlich ist. Auch die Zwergelefanten, die gleichzeitig auf Flores lebten, hatten viel größere Vorfahren.

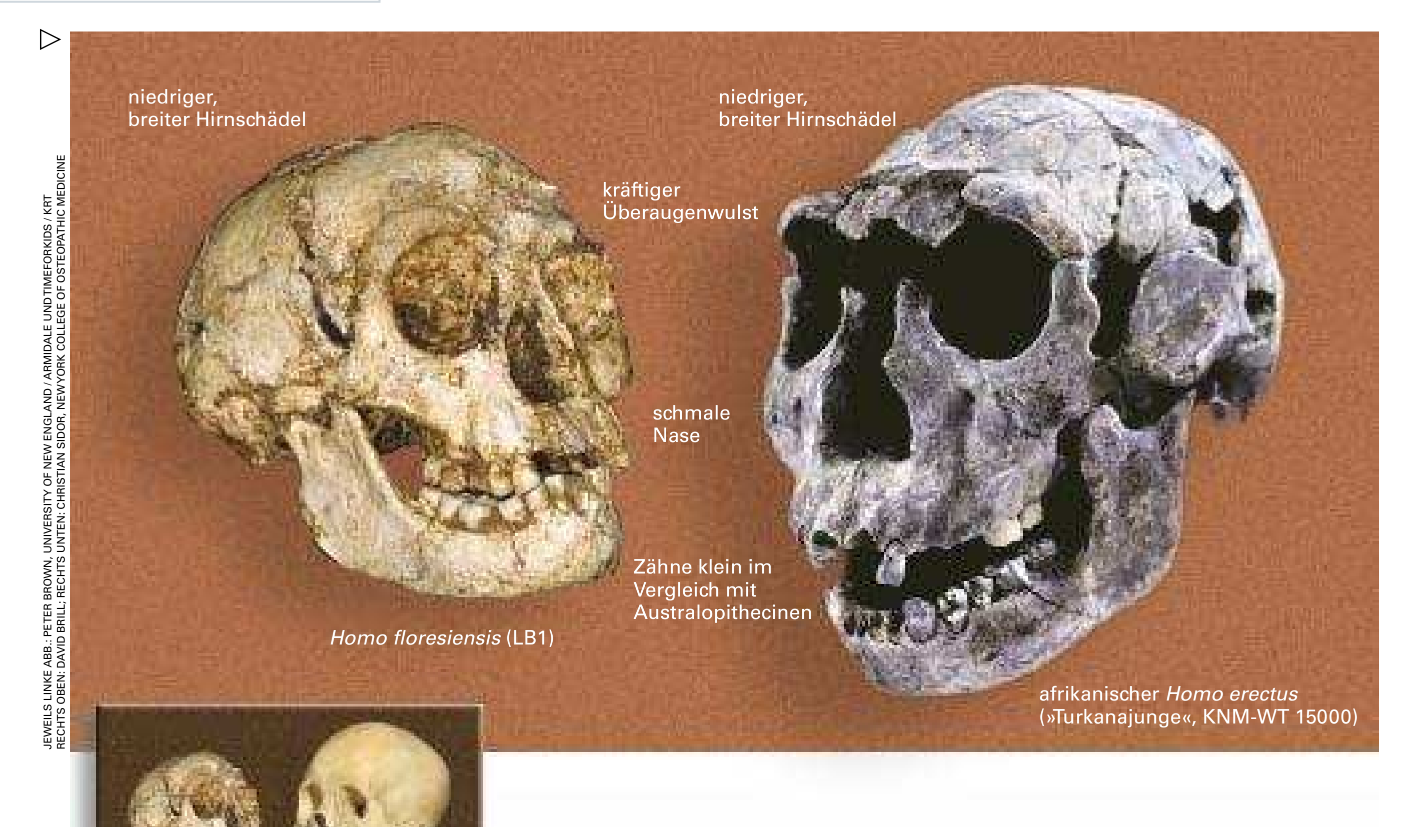
Normale Selektionszwänge?

Biologen vermuten, dass größere Tiere auf kleinen Inseln unter anderem wegen des knappen Nahrungsangebots, an das sie sich anpassen, kleiner werden. Ihnen gefährliche Raubfeinde gibt es dort meist ohnehin wenig. Für den Zwergmenschen auf Flores bedeuteten nur zwei Riesenechsen eine Gefahr: der Komodowaran, der noch in Restbeständen in einigen Gegenden dieser und auf den kleineren, östlich vorgelagerten Inseln vorkommt (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/1999, S. 48), sowie ein noch größerer damals lebender Waran.

Dennoch kannten Paläoanthropologen bisher im Menschenstammbaum keinen Fall, wo die Angehörigen einer Inselpopulation kleiner geworden wären. Seine Kultur, so nahm man an, überhob den Menschen solcher Selektionseinflüsse. So musste ihm in kaltem Klima nicht eigens ein Fell wachsen, sondern er konnte sich mit Feuer und Kleidung warm halten. Nun zeigt der Floresfund, dass der Mensch auf Ressourcenknappheit unter Umständen doch ähnlich wie andere große Säugetiere nach vorhersagbaren Gesetzmäßigkeiten mit körperlichen Anpassungen reagieren kann. Nach Richard Potts vom Nationalmuseum für Naturgeschichte der Smithsonian Institution in Washington, der ökologische Anpassungen von Hominiden untersucht, lag das Kleinerwerden durchaus ▷



Oft werden große Tiere auf Inseln kleiner, kleine hingegen größer. Dass eine Menschenlinie ähnliche Anpassungen durchmachte, überrascht. Der *Homo floresiensis* könnte von einem *Homo erectus* abstammen, der kaum kleiner war als der moderne Mensch.



Trotz des erstaunlich kleinen Gehirns passen viele Merkmale des Floresmenschen zur Gattung *Homo*. Die Entdecker halten ihn für einen Abkömmling von *Homo erectus*, allerdings für eine eigene Art. Das für einen *Homo sapiens* charakteristische Kinn fehlt, ebenso wie einige andere Merkmale des modernen Menschen.

im Potenzial des *Homo erectus*. Potts' Team fand Anfang 2004 in Olorgesailie in Kenia einen recht kleinen *Homo-erectus*-Schädel.

Das größte Rätsel aber gibt das im Vergleich mit anderen Vertretern der Gattung *Homo* und im Verhältnis zur Körpergröße winzige Gehirn des Floresmenschen auf. Eigentlich gilt das beträchtlich zunehmende Hirnvolumen als das hervorragende Kennzeichen der menschlichen Evolution. Es wuchs in den sechs oder sieben Millionen Jahren, seit der mutmaßlich früheste Vertreter der Hominiden im engeren Sinne, *Sahelanthropus*, erschien, auf mehr als das Dreifache, von 360 auf im Schnitt 1350 Kubikzentimeter beim modernen Menschen. Parallel dazu entwickelten die Hominiden ein wesentlich komplexeres Verhalten, wie viele archäologische Funde eindeutig erkennen lassen. In der Anthropologie galt bisher die Größenzunahme des Gehirns als Voraussetzung für die menschliche Kulturentwicklung.

Der indonesische Zwergmensch nun besaß, so vermuten seine Entdecker, trotz seines kleinen Gehirns durchaus hohe geistige Kapazitäten und verfügte über eine fortschrittliche Kultur. Zumindest habe er raffinierte Jagdmethoden beherrscht. Australopithecinen mit etwa gleich großem Gehirn hinterließen bestenfalls grob behauenes Steinwerkzeug, etliche Arten nicht einmal das. Bei gleicher Hirnmasse verstand der *Homo floresiensis* nach Ansicht des Forscherteams Geräte zu fertigen, wie man sie sonst eigentlich nur dem *Homo sapiens* zuschreibt.

Macht über das Feuer

Zwar stellen die meisten Artefakte von Liang Bua einfache Abschlaggeräte aus vulkanischem Gestein oder Feuerstein dar. Sie muten kaum moderner an als Geräte von späten Australopithecinen oder ganz frühen *Homo*-Arten. Doch zwischen den Elefantenknochen lagerten unter anderem fein gearbeitete Spitzen, große Klingen, Ahlen, mit denen man Löcher stechen konnte, sowie kleinere Klingen, die vielleicht als Speerspitzen dienten.

Die beteiligten Forscher glauben, dass der Floresmensch regelmäßig Elefanten erlegte. Hauptsächlich Knochen von Kälbern fanden sich in den Ablagerungen. Doch einzelne Tiere waren ausgewachsen und dürften nahezu eine halbe Tonne gewogen haben. Ein junges Kalb konnte wahrscheinlich ein Jäger allein töten. Für die Jagd auf einen erwachsenen Zwergelefanten und den Abtransport musste man aber sicherlich zu mehreren sein. Das erforderte eine hohe Koordination, so meint Richard G. (»Bert«) Roberts von der Universität Wollongong (New South Wales, Australien), einer der Mitarbeiter im Grabungsteam – was sicherlich auch sprachliche Kommunikation einschloss.

Die Forscher fanden in der Höhle auch verkohlte Tierknochen. Demnach nutzten die Jäger Feuer, um Mahlzeiten zu bereiten. Das stimmt nachdenklich. Die Zähmung des Feuers galt lange als späte Errungenschaft großhirniger Menschen. Konnte der Floresmensch mit seiner winzigen Menge an grauen Zellen wirklich schon das Feuer beherrschen?

Wenn die Entdecker von *Homo floresiensis* mit ihrer Einschätzung und Bewertung des Fundes Recht haben sollten,

dann wäre das einer der bedeutendsten paläoanthropologischen Neuigkeiten der letzten Jahrzehnte. Nicht nur hätte nach geologischen Maßstäben noch in jüngster Vergangenheit eine weitere Menschenart neben unserer gelebt – was für eine unerwartete Vielseitigkeit unserer Gattung spräche. Sondern man müsste sich auch neu darüber Gedanken machen, inwieweit die Gehirngröße überhaupt die Intelligenz bestimmt.

Widerspruch aus Expertenkreisen ließ denn auch nicht lange auf sich warten. Nur drei Tage nach der »Nature«-Veröffentlichung erschien in der australischen Zeitung »Sunday Mail« ein Leserbrief des Paläoanthropologen Marciej Henneberg von der Universität Adelaide. Der Forscher äußerte, die geringe Größe des Schädels wäre durchaus mit einer pathologischen Mikrozephalie vereinbar – einer beim modernen Menschen bekannten Missbildung. Bei schweren angeborenen Formen würden die Betroffenen im Kindesalter sterben. Doch Menschen mit milderer Ausprägung seien zwar geistig behindert, erreichten aber nicht selten das Erwachsenenalter.

Henneberg verglich den Hirn- und Gesichtsschädel von Flores mit einem viertausend Jahre alten, krankhaft mikrozephalen Exemplar von Kreta. Nach seinem Urteil gibt es zwischen beiden Schädeln in den Proportionen keine wesentlichen Unterschiede.

Der in tieferen Schichten gefundene einzelne Unterarmknochen stamme hingegen von einem etwa 1,50 bis 1,60 Meter großen – somit durchaus nicht kleinwüchsigen – Menschen. Das bedeute, auf der Insel hätten auch größere Menschen gewohnt. Henneberg möchte das Skelett LB1 somit eher einem modernen Menschen zuordnen, der an Mikrozephalie litt.

Dem widerspricht die Anthropologin Susan C. Antón von der New-York-Universität. Der Gesichtsschädel von modernen Menschen mit Mikrozephalie sehe anders aus. Außerdem seien von einer milderen Form Betroffene, die erwachsen werden, nicht zwergwüchsig. Doch auch Antón zweifelt, ob es sich bei dem Floresskelett um eine eigene Art handelt: »Zum *Homo erectus* gibt es nicht viele morphologische Unterschiede. Sicher könnte man für eine ganz neue Art plädieren. Aber eine Dogge und ein Chihuahua ähneln sich weniger.« Vielleicht sei es aber ein Vertreter von *Homo erectus* mit krankhaft gehemmtem Wachstum gewesen, ob nun durch Mikrozephalie oder durch Mangelernährung bedingt.

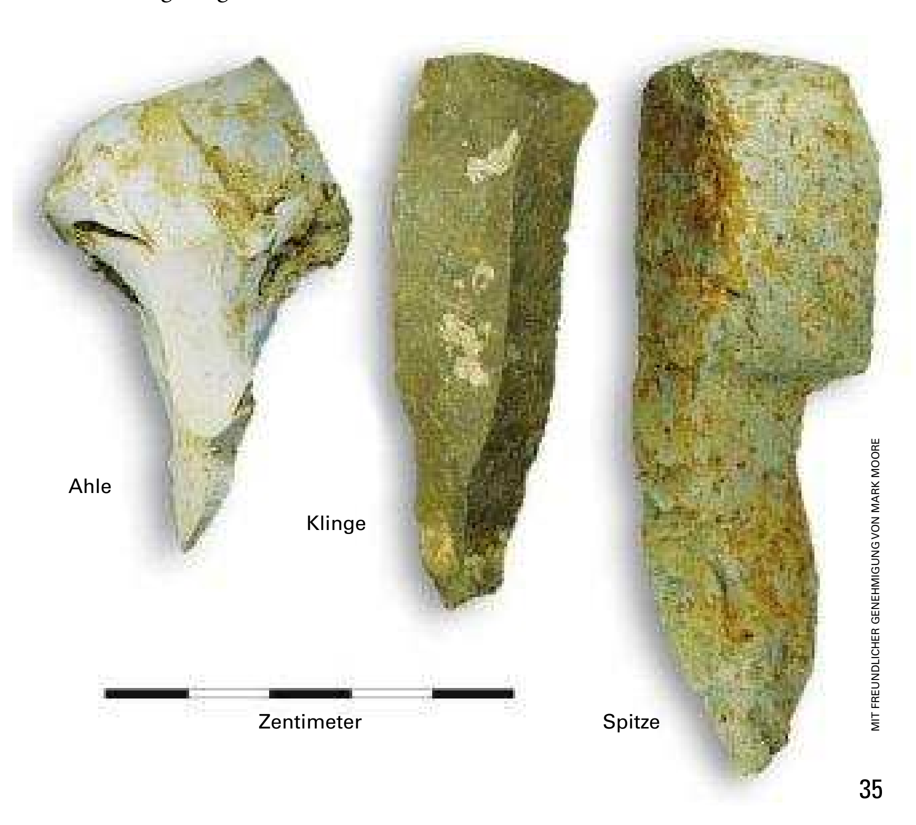
Andere Anthropologen halten den Floresschädel für noch primitiver. Colin P. Groves von der Australischen National-Universität in Canberra und David W. Cameron von der Universität Sydney erwägen eine nähere Beziehung zum *Homo habilis*. In die engere Abstammung jenes ganz frühen *Homo* würden unter anderem die Kleinhirnigkeit und der lange Hals des Oberschenkelknochens besser passen als zu einem viel höher entwickelten *Homo erectus*.

Schon ein *Homo* – ein Mensch – oder noch ein Vormensch?

Milford H. Wolpoff von der Universität von Michigan in Ann Arbor hält sogar einen Seitenzweig der Vormenschengattung *Australopithecus* für möglich. Bei einem Verwandten von *Homo sapiens* oder *Homo erectus* ließe sich die nachträgliche Gehirnverkleinerung kaum verstehen, zumal sie den Kleinwuchs des Körpers noch bei Weitem übertroffen habe. Bei einer näheren Verwandtschaft mit den afrikanischen Australopithecinen müsse man allerdings eine Erklärung für das im Vergleich viel schwächere Kieferskelett und zartere Gebiss des Floresmenschen finden.

Doch das sei lange nicht so schwierig wie die Rätsel, die das winzige Gehirn der Forschung aufgebe. Der zierlichere Kauapparat könne eine Anpassung an eine Nahrungsumstellung gewesen sein. Selektionskräfte, welche die Intelligenz minderten, kann sich Wolpoff dagegen in dem Fall nicht vorstellen.

Ein *Australopithecus* außerhalb Afrikas, der noch dazu bis nach Südostasien kam, wäre wissenschaftliche Sensation genug. Vollends ins Wanken geriete das Gebäude vom menschlichen Stammbaum, hätte dieser Zweig wirklich bis vor 18 000 Jahren – oder nach jüngsten Angaben noch länger – überlebt. Bisher stammen alle Fossilien der Gruppe aus Afrika und sind über 1,5 Millionen Jahre alt. Dennoch mussten Hominiden nicht erst – wie bisher angenommen – über lange Beine, ein großes Gehirn und eine entwickelte Technologie verfügen, um andere Kontinente erobern zu können. Die ältesten *Homo*-Fossilien vom Südrand des Kaukasus aus Dmanisi in Georgien stammen von recht urtümlichen, kleinen Hominiden, die einfache Steinwerkzeuge benutzten ähnlich denen, wie Australopithecinen sie bereits eine Million Jahre zuvor fertigten. ▷



Ausgefeilte Steingeräte wie diese dem kleinhirnigen Floresmenschen zuzuschreiben, fällt vielen Anthropologen schwer. Nach bisherigem Ermessen wirken sie eher wie Produkte eines *Homo sapiens*, eines modernen Menschen.

Heimat der Zwergmenschen



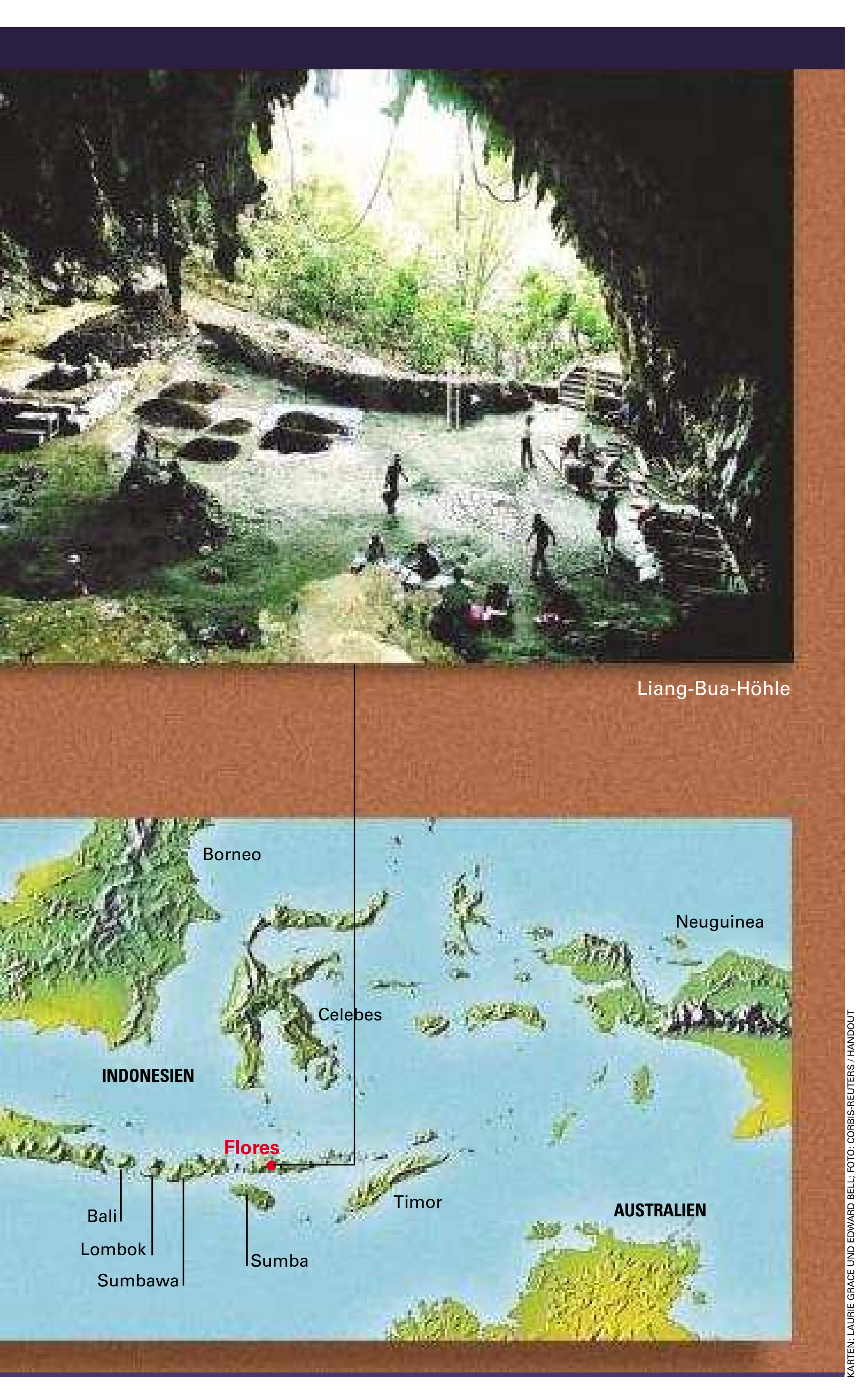
Vor zehn Jahren staunten die Wissenschaftler darüber, dass der *Homo erectus* noch vor 25000 Jahren auf Java gelebt haben soll. Damals war längst der moderne Mensch in die Region vorgedrungen und in Europa der Neandertaler verschwunden. Nun sorgen Berichte über eine angeblich dritte Menschenart in Indonesien, die dort bis vor 13000 Jahren vorkam, für Diskussionen.

Deren Überreste fanden Archäologen in den Sedimenten der Liang-Bua-Höhle, einer großen Kalksteinhöhle im westlichen Teil der Insel Flores. Wie die urtümlichen Menschen dorthin über das Wasser gelangt sein könnten, ist unklar. Als Ahne wäre geografisch der *Homo erectus* von Java plausibel. Morphologisch ähnelten die Floreszwerge aber mehr den frühen Menschen vom Kaukasus und afrikanischen *Homo-erectus*-Formen. Stammten sie von einer anderen Verbreitungswelle ab als der asiatische *Homo erectus*?

▷ Somit könnte sich im Prinzip auch schon ein *Australopithecus* nach Asien aufgemacht haben. Merkwürdig bleibt allerdings, dass von solchen Vormenschen auf dem Kontinent bisher keine weiteren Fossilien aufgetaucht sind. Womöglich gäbe es die doch, meint Wolpoff. In Indonesien seien in den 1940er Jahren eine Hand voll noch nicht genauer untersuchter Knochenreste aufgetaucht, die dafür vielleicht in Frage kämen. Zuerst wollten die Forscher die Fragmente einem *Australopithecus* zuweisen, dann ausgestorbenen Menschenaffen der Gattung *Meganthropus*. Schließlich entschieden sie sich aber für *Homo erectus*. Wolpoff hält es nun für geboten, diese Fossilien nochmals gründlich in Augenschein zu nehmen.

Neben den Kritikern gibt es viele Fachleute, die Browns und Morwoods Thesen unterstützen und die Deklaration einer neuen *Homo*-Art befürworten. »Mit ziemlicher Sicherheit hängen die

ren. Der *Homo-erectus*-Experte G. Philip Rightmire von der Staatsuniversität von New York in Binghamton hält diese Entscheidung ebenfalls für akzeptabel. Er spricht von einem kleinen Evolutionsexperiment auf der indonesischen Insel.



KARTEN: LAURIE GRACE UND EDWARD BELL; FOTO: CORBIS-REUTERS / HANDOUT

meisten Unterschiede zwischen dem Floresmenschen und anderen *Homo*-Vertretern mit den geringeren Körpermaßen zusammen. Das bewirkt auch die scheinbaren Ähnlichkeiten mit Australopithecinen«, meint zum Beispiel David R. Begun von der Universität Toronto. Das heißt: Als die Inselbewohner – Abkömmlinge einer *Homo-erectus*-Linie – schrumpften, näherten sie sich anatomisch in manchem den Australopithecinen an.

Weil sie einige Schlüsselmerkmale mit *Homo erectus*, ein paar jedoch mit anderen *Homo*-Arten teilten, sei es nur logisch, eine eigene *Homo*-Art zu deklarieren.

Wer war der Urheber?

Fast noch mehr Dispute lösten die Werkzeugfunde in der Liang-Bua-Höhle aus. Wie der Paläoanthropologe Richard Klein von der Stanford-Universität (Kalifornien) vermerkt, fanden sich offenbar unmittelbar bei dem LB1-Skelett, sofern überhaupt, nur ganz wenige fortschrittliche Artefakte. Die meisten davon lagen an anderen Stellen. Die ausgefeilteren Stücke könnten seiner Ansicht nach zu einer anderen Zeit von modernen Menschen gefertigt worden sein. Wie sich die einzelnen Schichten stratigrafisch zueinander ordnen, müssten erst weitere Ausgrabungen ergeben. Vielleicht würden auch noch Knochenreste von modernen Menschen auftauchen. Dann wäre zu fragen, ob tatsächlich zwei verschiedene Menschenarten in der Höhle Unterschlupf gefunden hatten oder ob die vermeintliche Zwergform nicht doch ein pathologisch kleinwüchsiger moderner Mensch war.

Auch ohne Berücksichtigung der geologischen Schichtungen seien die Steingeräte zu modern – und eigentlich auch zu groß –, um sie einem primitiven Zwergmenschen zuzuschreiben, vermerkt Groves. Zwar sollen diese fortschrittlichen Geräte bis zu 94 000 Jahre alt sein. Nach Ansicht des Grabungsteams können sie darum unmöglich schon vom modernen Menschen stammen. Doch Groves führt die Werkzeuge von Liujiang in China an, die auf 67 000 Jahre datiert sind und offensichtlich vom *Homo sapiens* gefertigt wurden. Noch frühere Spuren des modernen Menschen in Südostasien hält er nicht für ausgeschlossen. Der *Homo sapiens* habe sich, nachdem er Afrika verließ, schnell nach Ostasien ausgebreitet.

Dass die Beweislage dafür, der *Homo floresiensis* habe die fortschrittlichen Geräte gefertigt, ungenügend ist, denkt auch Bernard Wood von der George-Washington-Universität in Washington, DC. Doch einmal angenommen, diese kleinhirnigen Gnome hätten das wirklich vermocht, so sinniert der Forscher: Wie wären geistige Fähigkeiten dann mit der Hirngröße vereinbar? »Warum war- ▷

teten die Hominiden so lange, bis sie Werkzeuge machten, wenn sie dazu nicht wesentlich mehr graue Zellen brauchten als ein Schimpanse?«

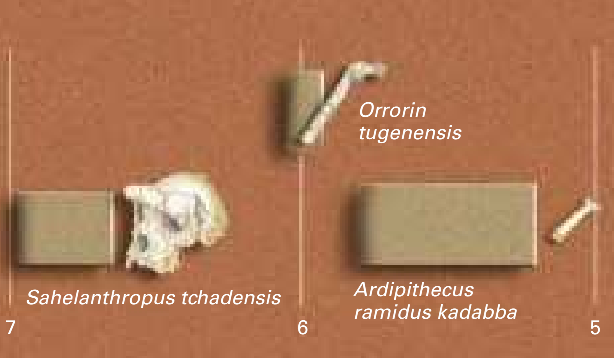
Ähnlich äußert sich Rightmire: »Konnte *Homo floresiensis* hoch entwickelte Steingeräte herstellen, so müsste man daraus schließen, dass die Gehirngröße gar nicht so viel besagt.« Sogar bei intelligenten heutigen Menschen gibt es beträchtliche Volumenunterschiede. Anatole France (1844–1924), Literaturnobelpreisträger von 1921, soll nur gut 1000 Kubikzentimeter besessen haben, der englische Staatsmann Oliver Cromwell (1599–1658) doppelt so viel. »Offenbar ist die Größe ab einem bestimmten Wert gar nicht so entscheidend. Der Schlüssel ist dann die Organisation des Gehirns, die innere Verdrahtung«, folgert Pott.

Einiges darüber verrät schon die äußere Morphologie. Gut erhaltene Schädel können Paläontologen innen mit Latex abformen und die Kontur dann mit Kunststoff ausgießen. Doch der Schädel von LB1 ist hierfür zu fragil. Brown möchte deswegen das Schädelinnere anhand von computertomografischen Aufnahmen dreidimensional zunächst virtuell und dann als gegenständliches Gehirnmodell mit moderner Stereolithografie rekonstruieren.

Zuwachs in unserer Verwandtschaft

Lebten zeitgleich mit dem *Homo sapiens* noch drei weitere Menschenarten – sofern auch der Neandertaler als eigene Art eingestuft wird? Die Forscher, die das Floresskelett beschrieben, postulieren das: Sie bezeichnen die zwergenhafte Form als *Homo floresiensis*. Nach ihrer Einschätzung stammten diese kleinwüchsigen Menschen vom *Homo erectus* ab (kleines Bild).

Andere Wissenschaftler vermuten allerdings, dass es sich lediglich entweder um einen, vielleicht pathologisch, zwergwüchsigen modernen Menschen handelte oder um einen kleinwüchsigen *Homo erectus* – wenn es nicht sogar ein Abkömmling einer der frühesten Arten am Übergang zur menschlichen Gattung *Homo* war oder sogar noch ein Australopithecine.



PATRICIA J. WYNNE, CORNELIA BLIK UND EDWARD BELL

Pfiffig trotz Kleinstgehirn

»Es würde mich umhauen, wenn wir am Ende ein normales Erwachsenengehirn in Kleinformat zu sehen bekommen«, kommentiert die Paläoneurologin Dean Folk von der Universität von Florida in Tallahassee. Aber wenn die Hirnwindungen nun eher aussehen wie beim Schimpansen? Experten wissen bisher nicht, ob größere Gehirne sich hauptsächlich wegen des vermehrten Volumens anders falten oder ob die andere Faltung auch gesteigerte geistige Fähigkeiten spiegelt. Womöglich gibt das Gehirn des Floresmenschen hierüber Aufschluss, sinniert die Wissenschaftlerin.

Mittlerweile haben die Forscher nach eigener Aussage in der Liang-Bua-Höhle Knochenreste von etwa einem halben Dutzend weiteren Individuen geborgen. Deren Merkmale passen zu denen des im Jahr 2003 gefundenen Skeletts. Auch die Knochen der recht langen Arme von LB1, die noch fehlten, tauchten kürzlich auf. Die neuen Stücke sind zwar fragmentarischer als die Überreste von LB1. Aber insbesondere ein Unterkiefer erscheint wichtig, hat er doch nach Aussage der Entdecker die gleiche Größe wie der zu dem Skelett gehörige. Dies unterstützt die Auffassung von einer Population einer zwergenhaften Menschenform.

Obwohl sich die Forscher davon nicht allzu viel erhoffen, lassen sie an der Universität Oxford Haare, die womöglich von jenen Menschen stammen, auf genetische Reste untersuchen. Die Chance ist klein, dass im Tropenklima DNA-Spuren erhalten blieben, dessen ist sich das Team bewusst. Trotzdem würde es auch die Knochenreste und gefundenen Zähne gern auf Erbreste prüfen lassen.

Derzeit ist das weitere Schicksal des gesamten Knochenmaterials ungewiss. Zunächst lagerten die Fundstücke beim indonesischen Zentrum für Archäologie in Jakarta. Gegen den Protest von einigen dortigen Mitarbeitern verfügte Ende November 2004 der oberste indonesische Paläoanthropologe, Teuku Jacob von der Gadjah-Mada-Universität in Yogyakarta auf Java, die Fundstücke in sein eigenes Labor zu verfrachten – für eingehende Untersuchungen.

Jacob war an den Ausgrabungen und ersten Analysen nicht beteiligt gewesen. Den Floresmenschen hält der *Homo-erectus*-Experte für einen krankhaft mikrozephalen *Homo sapiens*. Den Entdeckern hat er eine schnelle Rückgabe zugesichert. Allerdings soll er dafür bekannt sein, dass er nur beschränkt Zugang zu Fossilien gewährt. Manche seiner Kollegen fürchten, diese Knochen werden nun nie wieder untersucht werden – leider dann auch nicht die neuen, noch unbeschriebenen.

Zukünftig möchte Brown vor allem nach den nächsten großwüchsigen Vorfahren der Floreszwerge suchen. Er sieht drei mögliche Szenarien. Entweder entstand die kleine Menschenform auf der Insel selbst aus einem größeren *Homo*. Der hätte dann wohl die 840 000 Jahre alten Steingeräte aus dem Soabecken gefertigt. Oder die Population kam schon kleinwüchsig auf die Insel. In dem Fall könnte die Verzwergung auf einer anderen Insel Südostasiens stattgefunden haben. Es sei denn – die dritte Möglichkeit –, bereits die ersten Vertreter dieser

Population waren klein, als sie in die Region vordrangen. LB1 ähnele in vieler Hinsicht stärker dem afrikanischen *Homo erectus* – und den Hominiden von Dmanisi in Georgien – als dem Javamenschen. Das muss nicht bedeuten, dass der Floresmensch eine andere, frühere Einwanderung repräsentiert als der *Homo erectus* Javas. Die Ähnlichkeiten mit den älteren Linien könnten nachträglich durch den Zwergenwuchs hervorgetreten sein. Aufklärung erhoffen sich die Forscher von weiteren Grabungen auf Flores, auf Java sowie anderen abgelegenen Inseln wie Celebes.

Märchen mit wahrem Kern

Zwischen 95 000 und 13 000 Jahre alt sind nach derzeitiger Kenntnis die bis jetzt in der Liang-Bua-Höhle gefundenen menschlichen Knochen. Das Forschungsteam spekuliert, dass die kleinen Menschen vor etwa 12 000 Jahren einem massiven Vulkanausbruch zum Opfer fielen, gleichzeitig mit den Zwergelefanten. Weiter im Osten mag der *Homo floresiensis* sogar noch länger überlebt haben. Die Wissenschaftler planen auch auf Lombok und Celebes Grabungen in Schichtungen des fraglichen Zeitraums. Eine Menschenlinie, die über diese Inseln Flores erreichte, könnte dort ihre eigenen markanten Spuren hinterlassen haben.

Es gibt Anzeichen dafür, dass der *Homo erectus* vielleicht noch bis vor 25 000 Jahren auf Java vorkam. Der *Homo sapiens* tauchte in der Region vor rund 40 000 Jahren auf. Womöglich existierten dort in der jüngeren Vergangenheit wenigstens 15 000 Jahre lang drei Menschenarten nah beieinander.

Selbst dass Restpopulationen der Zwergmenschen auf einigen Inseln noch in historischer Zeit wohnten, halten Brown, Morwood, Roberts und ihre Kollegen nicht für völlig ausgeschlossen. Vielleicht verstecken sich letzte Gruppen in abgeschiedenen Regenwaldgebieten. Die Menschen erzählen, dass man Ebu Gogo noch begegnete, als die Holländer im 19. Jahrhundert auf Flores siedelten. Die Malaysier wissen Geschichten von dem kleinen, menschenähnlichen Orang Pendek. Sie glauben, dass dieses Wesen bis heute in den schwer zugänglichen Wäldern Sumatras haust.

»Offenbar kennt jedes Land hier eigene Mythen von solchen Wesen«, bemerkt Brown dazu. »Überall haben wir gegraben und bisher nie Anhaltspunkte gefunden. Jetzt plötzlich stießen wir auf LB1.« Ob die Märchen einen wahren Kern haben, wird vielleicht nie festzustellen sein. Die Forschung wird diese Möglichkeit dennoch beflügeln. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Kate Wong ist leitende Redakteurin bei Scientific American.

Evolution des Menschen II. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2004

Archaeology and age of a new hominin from Flores in eastern Indonesia. Von M. J. Morwood et al. in: Nature, Bd. 431, S. 1087, 28. Okt. 2004

A new small-bodied hominin from the late pleistocene of Flores, Indonesia. Von P. Brown et al. in: Nature, Bd. 431, S. 1055, 28. Okt. 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

FORENSISCHE BALLISTIK

Fingerabdruck einer Schusswaffe

Unter dem Mikroskop geben Munitionskugeln ihr Geheimnis preis.

Von Thorsten Krome und Mark Fischetti

Häufig sind es Spuren am Tatort, die einen Verbrecher überführen. Wurden Schusswaffen verwendet, liefert die eingehende Analyse von Patronenhülsen und Geschossresten den Ermittlern oft wichtige Informationen. Schon das Bruchstück einer Kugel kann beispielsweise verraten, ob die Waffe zuvor bei einem Verbrechen verwendet wurde. Vorausgesetzt, sie wurde in der Vergangenheit bereits von den Experten des Bundeskriminalamtes (BKA) erfasst.

Wird etwa eine Pistole bei einer Verkehrskontrolle oder nach einem Banküberfall sichergestellt, geben die Ermittler deshalb Testschüsse damit ab. Die Geschosse werden zur Analyse an das BKA geschickt. Etwa 5000 derartige Untersuchungen führt diese zentrale Institution pro Jahr durch, dazu kommen jährlich rund 600 Analysen von Tatmunition.

Erhoben werden charakteristische Spuren, welche die verschiedenen Komponenten einer Feuerwaffe auf Munitionsteilen hinterlassen. Dazu gehört die Delle, die der Schlagbolzen dem Zündhütchen beziehungsweise dem Boden der Patronenhülse einprägt. Wird die Hülse beim Abfeuern gegen die Rückwand des Verschlusses gepresst, entstehen Stoßbodenspuren.

Nicht nur der Blick auf die Patronenhülsen lohnt, auch die Kugel selbst verrät vieles. Spiralförmig gewundene Rillen im Waffenlauf – die Züge – sollen dem Projektil einen definierten Drall um die Längsachse geben, der die Flugbahn stabilisiert und so die Treffsicherheit erhöht. Dazu muss es die Züge aber ausfüllen, deshalb ist der Durchmesser des Projektils, das so genannte Kaliber, etwas größer als das Innenkaliber der Waffe. Während sich die Kugel beim Schuss durch den Lauf quetscht, prägt sich ihr also ein Riefenmuster auf.

Sind diese bereits mit bloßem Auge oder der Lupe sichtbaren Spuren bei Waffen gleichen Typs meist noch identisch, so zeigen sich unter dem Mikroskop weitaus individuellere Merkmale: Kleinste Unebenheiten und Grate im Lauf und an anderen Waffenteilen hinterlassen ein mikroskopisches Rillenmuster, das äußerst selten bei zwei Waffen auch nur ähnlich ausfällt.

All diese Spuren ergeben in Summe eine Art ballistischen Fingerabdruck. Je nach gewünschter Vergrößerung nutzen die Ermittler des BKA die Stereolupe, das optische Vergleichsmikroskop oder ein Rasterelektronenmikroskop (Rem). Das Besondere an all diesen Instrumenten: Zwei Kugeln – Tat- und Vergleichsmunition – lassen sich gleichzeitig untersuchen, wobei mikroskopische Bilder direkt nebeneinander betrachtet werden können. Stimmen die Muster überein, stammt die betreffende Kugel oder Hülse mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der fraglichen Waffe. ◁

Der Physiker **Thorsten Krome** befragte das BKA zum Thema, **Mark Fischetti**, Autor von Scientific American, machte sich bei den amerikanischen Behörden kundig.

▶ Jeder gezogene Waffenlauf prägt einer Munition charakteristische Zug- und Feldmuster auf. Hier ist beispielsweise ein Lauf mit einem »Drall 4/rechts« abgebildet, das heißt, je vier Züge und Felder beschreiben eine Rechtsschraube. Dem entspricht das Furchenmuster auf dem Projektil. Das Betätigen des Abzugs bewirkt, dass der gespannte Schlagbolzen gegen den Boden der Patronenhülse beziehungsweise gegen das Zündhütchen prallt. Dies entzündet eine Treibladung und die nachfolgende Explosion treibt die Kugel aus. Dabei wird die Hülse mit enormer Wucht an den Stoßboden der Pistole gepresst, was charakteristische Spuren hinterlässt.



Spuren am Hülsenboden der Tatmunition (rechts) ähneln den Einkerbungen, die beim Abschuss von Vergleichsmunition mit einer am Tatort gefundenen Waffe zu sehen sind (links).



Zwei Kugeln mit je sechs rechtsdrehenden Feld- und Zugfurchen. Deren Neigungswinkel ist jedoch unterschiedlich, was darauf hindeutet, dass die Projektile aus unterschiedlichen Schusswaffen abgefeuert wurden.



Mikroskopisch feine Rillen auf der Tatmunition (links) zeugen von geringfügigen Unregelmäßigkeiten im Waffenlauf. Dazu passt das Muster von Vergleichsmunition (rechts), die von Testschüssen einer sichergestellten Pistole stammt.



Selbst Geschossreste weisen häufig noch genug charakteristische Merkmale auf, die Ermittlern bei der Lösung eines Falls helfen können.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Ein drei Meter langer Wassertank** gehört zur Standardausrüstung beim Test von Schusswaffen. Das Wasser bremst die Projektile, sodass eine Pistolenkugel schon nach etwa 1,5 Metern zu Boden fällt und eingesammelt werden kann.

▶ **Als Begründer der forensischen Ballistik** gilt der Londoner Polizist Henry Goddard. Er überführte 1835 einen Mörder auf Grund einer kleinen Erhebung auf der tödlichen Bleikugel. In der Wohnung des Tatverdächtigen fand Goddard eine Gussform mit dazu passender Eintiefung. Damit konfrontiert, gestand der Besitzer das Verbrechen.

▶ **In den Datenbanken des Bundeskriminalamts (BKA)** sind rund 6000 Bilder von Hülsen und fast 2000 Geschossen abgelegt, dazu kommen noch Daten zu etwa 650 verschiedenen Waffensystemen. Die Ermittler können zudem auf ein amerikanisches Informationsnetzwerk zugreifen, das weitere 14000 Einträge aufweist.



GRAFIKEN: DANIELS & DANIELS; FOTOS: SCOTT DOYLE / FIREARMSID

▶ **Erst das Vergleichsmikroskop ermöglichte den Durchbruch in der forensischen Ballistik. Mit ihm lassen sich Tat- und Vergleichsmunition bei verschiedenen Vergrößerungen parallel auf gemeinsame Charakteristika untersuchen. Die Ermittler können die Patronenteile beliebig drehen.**

Das sprunghafte Klima

Eine weiter andauernde globale Erwärmung könnte plötzlich in eine neue Kaltzeit umschlagen. Solche unerwarteten Klimaumschwünge hat es in der Erdgeschichte schon mehrfach gegeben – manchmal innerhalb weniger Jahre.

Von Richard B. Alley

Urplötzlich bricht in dem Hollywood-Film »The Day after Tomorrow« eine Eiszeit über die Erde herein. Während Millionen Nordamerikaner ins sonnige Mexiko flüchten, belauern Wölfe das letzte Häuflein Menschen, das eng aneinander gekauert im gefriergetrockneten New York ausharrt. Tornados verwüsten Kalifornien, und riesige Hagelkörner prasseln auf Tokio nieder.

Ist ein derart dramatischer Klimaumschwung in naher Zukunft denkbar, oder haben die Fox Studios maßlos übertrieben? Die meisten Experten glauben, dass in den kommenden Jahrzehnten keine wirkliche Eiszeit droht. Dennoch hat sich in der Vergangenheit das Klima schon mehrfach jäh geändert, und dies könnte auch heute passieren. Es scheint mir sogar unvermeidlich.

Jüngste Erkenntnisse lassen vermuten, dass die vom Menschen verursachte globale Erwärmung dabei eine fatale Rolle spielt: Sie könnte der Auslöser sein, der das Klimasystem kippen lässt. Die Lebensbedingungen auf dem Planeten würden sich dadurch drastisch ändern. Und wir könnten nicht hoffen, dass sich die alten Verhältnisse bald wieder einstellen. In der Vergangenheit ist das Klimasystem nach einer plötzlichen Änderung in der Regel über Jahrtausende in seinem neuen Zustand geblieben.

Diese Erkenntnis verdanken wir vor allem Eisbohrkernen, die in den frühen 1990er Jahren aus dem mächtigen Eisschild Grönlands gezogen wurden. Aneinander gelegt sind sie fast drei Kilometer lang und enthalten erstaunlich genaue Informationen über das Klima der letzten 110 000 Jahre. Forscher können darin Jahresschichten unterscheiden und sie mit Hilfe einer Vielzahl von Methoden datieren. Aus der Zusammensetzung des Eises lässt sich außerdem die Temperatur ableiten, bei der es gebildet wurde.

Temperatur fährt Achterbahn

Die Bohrkerne offenbaren eine weit zurückreichende Serie von starken Klimaschwankungen, wobei lange, sehr kalte Abschnitte mit kurzen, wärmeren Episoden abwechselten. Zentralgrönland erlebte extreme Kälteeinbrüche, bei denen die Durchschnittstemperatur binnen weniger Jahre um bis zu sechs Grad Celsius absackte. Andererseits fand die Hälfte der Erwärmung seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor etwa 11 500 Jahren – ein Temperatursprung um mehr als zehn Grad Celsius – in nur einem Jahrzehnt statt. Auf die heutige Situation übertragen hieße das, dass es in Moskau ähnlich heiß würde wie derzeit in Madrid.

Die Dicke der Jahresschichten in den Eiskernen zeigt zugleich, dass parallel zum Temperaturanstieg der Niederschlag zunahm. So verdoppelte sich der Schneefall in Grönland innerhalb eines einzigen Jahres. Aber auch andere Gebiete wurden damals feuchter. Wie die Analyse fossiler Luftblasen im Eis ergab, gelangte während der starken Temperaturzunahme fünfzig Prozent mehr von dem Sumpfgas Methan in die Atmosphäre als zuvor – ▷

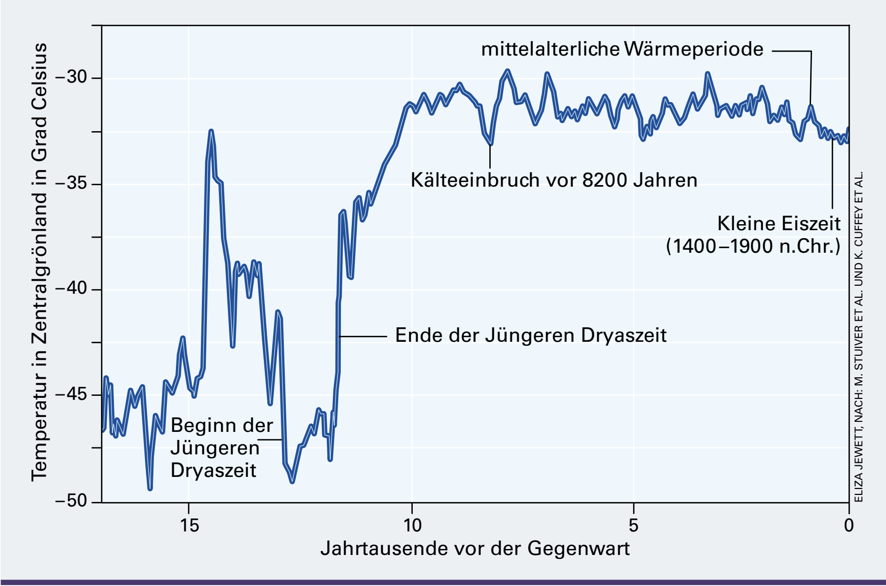
SLIM FILMS

Der plötzliche Wechsel zwischen völlig verschiedenen Zuständen – zum Beispiel Backofen und Eiskeller – ist ein charakteristisches Merkmal des irdischen Klimasystems.



Vergangenheit als Menetekel?

Die Erdgeschichte war schon immer durch plötzliche Klimaumschwünge geprägt. So verraten Eiskerne aus Grönland, dass starke Temperaturschwankungen die allmähliche Erwärmung unterbrachen, die vor etwa 18000 Jahren begann und die Erde aus der letzten Eiszeit herausführte (links). Bei fossilen Muschelschalen aus Seesedimenten von der Halbinsel Yu-




Nur noch Ruinen sind von den mittelalterlichen Siedlungen der Wikinger in Grönland übrig. Eine plötzliche Kälteperiode – die so genannte Kleine Eiszeit – vertrieb die Nordmänner von der arktischen Insel.

RUDY BRUEGGEMANN

▷ höchstwahrscheinlich, weil durch Überschwemmungen in den Tropen neue Feuchtgebiete entstanden und im Norden zugefrorene Sümpfe auftauten.

Die Eiskerne enthielten auch Informationen über andere Umweltbedingungen (SdW 4/1998, S. 50). So lieferte die eingeschlossene Menge an Staub aus Asien Hinweise auf die vorherrschende Windrichtung. Generell müssen die Winde in warmen Zeitabschnitten abgeflaut sein, weil in diesen Phasen weniger angewehtes Salz aus dem Meer und weniger Vulkanasche von weit entfernten Eruptionen im Eis vorkommen.

Insgesamt gab es in den vergangenen 110000 Jahren mehr als zwanzig starke, plötzliche Erwärmungen in Grönland. Das mildere Klima hielt dann jeweils einige Jahrhunderte bis Jahrtausende an, bevor eine allmähliche Abkühlung einsetzte, die in einem Temperatursturz innerhalb nur eines Jahrhunderts gipfelte. Dann begann der Zyklus von Neuem – mit einer weiteren Erwärmung innerhalb nur weniger Jahre.

In Zeiten extremster Kälte gelangten Eisberge bis zur portugiesischen Küste. Dagegen war die jüngste Kälteperiode, die von etwa 1400 bis 1900 n. Chr. dauerte und als Kleine Eiszeit bekannt ist, ausgesprochen harmlos. Dennoch vertrieb sie wahrscheinlich die Wikinger aus Grönland.

IN KÜRZE

▶ Beim Thema **Klimawandel** geht es in Politik und Wissenschaft fast nur um die globale Erwärmung. Doch in der Vergangenheit hat das Klima oft **dramatische Sprünge** gemacht, vor denen wir auch heute nicht sicher sind.

▶ So könnte sich eine zunächst regional begrenzte **Dürre**, die in einem Sommer auftritt, ausweiten und Jahrzehnte andauern, sodass fruchtbares Ackerland in weiten Teilen Asiens und Nordamerikas vernichtet würde. In Europa wäre ein **massiver Kälteeinbruch** denkbar, der innerhalb weniger Jahre sibirische Verhältnisse bringt.

▶ Noch wissen die Klimaexperten nur ansatzweise, was solche Umschwünge auslöst. Allerdings ist ziemlich sicher, dass **Umweltsünden** wie der massive **Ausstoß von Treibhausgasen** das Risiko einer plötzlichen, lang anhaltenden Klimaänderung erhöhen.

Um die weltweite Klimaentwicklung zu rekonstruieren, ergänzten die Forscher die Befunde aus der Arktis durch Daten aus anderen Regionen. Dabei zogen sie die Zusammensetzung und Ausdehnung mächtiger Gebirgsgletscher, die Dicke der Jahresringe von Bäumen sowie das Artenspektrum fossiler Pollen und Muscheln im Bodenschlamm von Seen und Ozeanen heran. Das resultierende Gesamtbild ergab, dass während extrem frostiger Phasen in Grönland auch in Europa und Nordamerika kalte, trockene und sehr windige Bedingungen herrschten. Dagegen war es im Südatlantik und der Antarktis ungewöhnlich warm.

Dabei gingen die raschen Temperaturschwankungen mit ebenso drastischen Veränderungen der Niederschlagsmenge einher. Kälteperioden in der Arktis sorgten für Dürre in Nordafrika und Indien. Dadurch verwandelte sich die Sahara vor ungefähr 5000 Jahren von einer grünen Landschaft mit zahlreichen Seen in jene Stein-, Sand- und Salzwüste, die wir heute kennen. Eine zwei Jahrhunderte anhaltende Trockenheit vor etwa 1100 Jahren trug wahrscheinlich zum Untergang der Mayakultur in Mittelamerika bei.

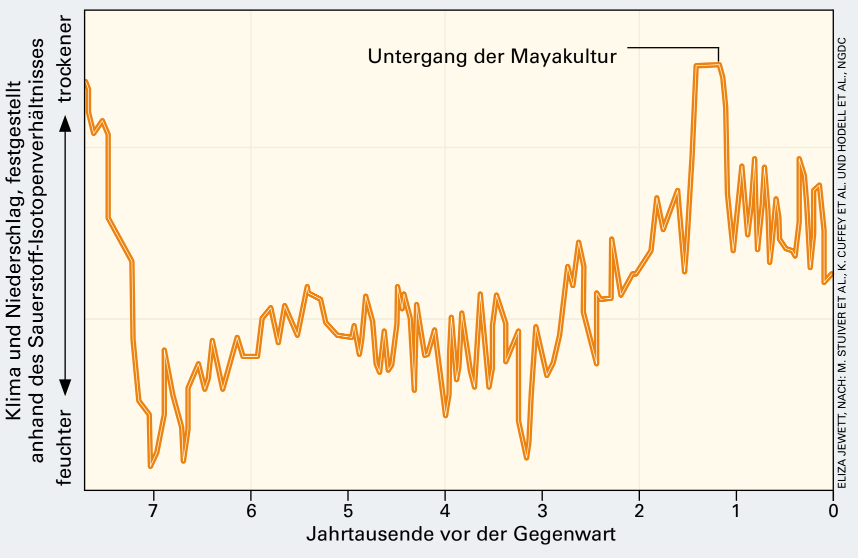
In unserer Zeit beeinflussen das El-Niño-Phänomen und andere Anomalien im Südpazifik manchmal auch das Wettergeschehen in weit entfernten Regionen

katan (Mexiko) zeugt ein Ausschlag im Sauerstoff-Isotopenverhältnis von einer plötzlichen extremen Dürreperiode, in der mehr Wasser aus dem See verdunstet, als durch Niederschlag hineingelangt ist (rechts). Derart rasche Veränderungen haben oft menschliche Zivilisationen beeinträchtigt und manchmal ihren Untergang ausgelöst (Fotos).



Der Regengott der Maya – hier als Statue im Vordergrund – konnte die Dürre nicht verhindern, die heute viele Archäologen für den Untergang der Mayakultur vor etwa 1100 Jahren verantwortlich machen.

CORBIS / FREELANCE CONSULTING SERVICES PTY LTD



ELIZA JEWETT, NACH: M. STUIVER ET AL., K. CUFFEY ET AL. UND HODELL ET AL., NGDC

noch stark genug, um überraschende Dürreperioden auszulösen – so die berüchtigte »dust bowl« in den 1930er Jahren, als weite Bereiche im mittleren Westen der USA völlig austrockneten und zur »Staubschüssel« wurden.

Kein Zurück mehr nach dem Umschwung

Die Ursache der Klimaumschwünge in der Vergangenheit war letztlich stets dieselbe. Immer driftete ein das Klima bestimmender Faktor durch die allmähliche Veränderung der Temperatur oder einer anderen physikalischen Größe auf eine unsichtbare Schwelle zu. Sobald er sie überschritt, welchselte er – und mit ihm das Klima – abrupt in einen anderen Zustand. Dort verharrte er dann meist für längere Zeit.

Das Überschreiten einer Klimaschwelle lässt sich mit dem Umkippen eines Kanus vergleichen, in dem Sie auf einem See sitzen. Wenn Sie sich allmählich zur Seite lehnen, beginnt sich das Boot zu neigen. Durch Ihre Bewegung drücken Sie es auf die Kippschwelle zu – eine Schräglage, jenseits derer sich das Kanu nicht länger aufrecht halten kann. Lehnen Sie sich nur ein wenig weiter nach außen, kentert es.

Der Faktor, der die im Grönlandeis dokumentierten Klimaumschwünge auslöste, war nach Ansicht der meisten Forscher das Strömungsmuster im Atlantik. Im Osten Nordamerikas und im nordwestlichen Europa herrscht heute ein gemäßigtes Klima, weil stark salzhaltiges Atlantikwasser, von der Sonne im Süden erwärmt und eingedunstet, über den Äquator nach Norden strömt. Dort gibt es seine Wärme ab und wird folglich kälter und dichter. Dadurch sinkt es östlich und westlich von Grönland in die Tiefe und wandert am Meeresboden entlang nach Süden zurück. Zum Ausgleich strömt an der Oberfläche warmes Wasser aus tropischen Breiten nach. So kommt eine Zirkulation nach Art eines Förderbands in Gang, die den Norden erwärmt und den Süden abkühlt.

Aus den Eiskernen geht hervor, dass Kälteeinbrüche dann auftraten, wenn das Oberflächenwasser im Nordatlantik salzärmer geworden war – vielleicht weil Süßwasserseen die Gletscherdämme, hinter denen sie aufgestaut waren, durchbrachen und sich ins Meer ergossen. Offenbar hatte die Erwärmung damit die kritische Schwelle überschritten, bei der das Klimasystem kippte. Weniger salzhaltiges Wasser ist nämlich spezifisch leichter und sinkt folglich nicht so gut ab – oder gefriert gar an der Oberfläche als Meereis. Dadurch sollte sich das Förderband verlangsamt haben oder ganz ins Stocken geraten sein. Als Folge davon verlor der Nordatlantik seine Fernheizung und kühlte sich drastisch ab. Das Klima auf den angrenzenden Kontinenten glich sich demjenigen von Sibirien an (siehe Kasten auf S. 46).

Achttausend Jahre sind seit der letzten großen Kältewelle im Nordatlantik vergangen. »Lehnen« wir uns heute vielleicht auf die richtige Seite, um ein Kentern des Klimakanus zu verhindern? Durchaus möglich, aber die meisten Experten vermuten, dass wir das Boot schaukeln – indem wir ungemein viele Aspekte unserer Welt leichtsinnig verändern. Besonders beunruhigend ist der vom Menschen hervorgerufene Anstieg der Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre. Da sie wie eine Glasglocke die Wärme an der Erdoberfläche zurückhalten, verursachen sie eine globale Erwärmung (Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 50).

Der von den Vereinten Nationen eingesetzte Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimafragen (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) hat vorhergesagt, dass die weltweite Durchschnittstemperatur in den kommenden hundert Jahren um 1,5 bis 4,5 Grad Celsius steigen wird. Viele Computermodelle, die diese Prognose stützen, sagen auch ein Erlahmen des nordatlantischen Förder- ▷

bands voraus. Das aber würde zu einer plötzlichen Abkühlung um viele Grad Celsius führen – eine paradoxe Situation, die der Film »The Day after Tomorrow« ausmalt.

Noch gibt es viele Fragezeichen. Auch wenn die Experten eine neue Eiszeit für unwahrscheinlich halten, könnte der Temperatursturz doch viel stärker ausfallen als bei der Kleinen Eiszeit – mit entsprechend drastischen Folgen: Nicht nur die Themse in London würde – so wie damals – im Winter zufrieren.

Überflutungen und Dürren

Noch schlimmer als der mögliche Kälteeinbruch im Norden wären vermutlich seine fatalen Auswirkungen auf andere Erdregionen. Klimaarchive aus den Monsungebieten Afrikas und Asiens deuten darauf hin, dass dort die Niederschläge besonders gering ausfallen, wenn der Nordatlantik kälter ist als die ihn umgebenden Landmassen. Schon die Abkühlung beim Erlahmen des Förderbands könnte ausreichen, um eine solche Austrocknung hervorzurufen. Angesichts der Milliarden von Menschen, die auf den Monsunregen angewiesen sind, um Bewässerungsfeldbau betreiben zu können, dürfte auch eine mäßige Dürre zu verbreiteter Hungersnot führen.

Aber selbst wenn das nordatlantische Förderband nicht ins Stocken gerät, könnte die globale Erwärmung in anderen Regionen zum Überschreiten kritischer Schwellen führen. In den Getreidegürteln, die sich in mittleren Breiten quer durch mehrere Kontinente ziehen, drohen längere Dürreperioden. Die meisten Klimamodelle sagen bei steigender globaler Mitteltemperatur größere sommerliche Trockenheit in diesen Gebieten voraus – unabhängig von den Strömungsverhältnissen im Nordatlantik. Andererseits sollte es nach denselben Modellen insgesamt mehr Niederschläge geben – wahrscheinlich in Form von heftigeren Stürmen und Überflutungen. Diese Starkregen, die als solche gleichfalls problematisch sind, können das Ausdörren der Böden aber letztlich wohl nicht verhindern.

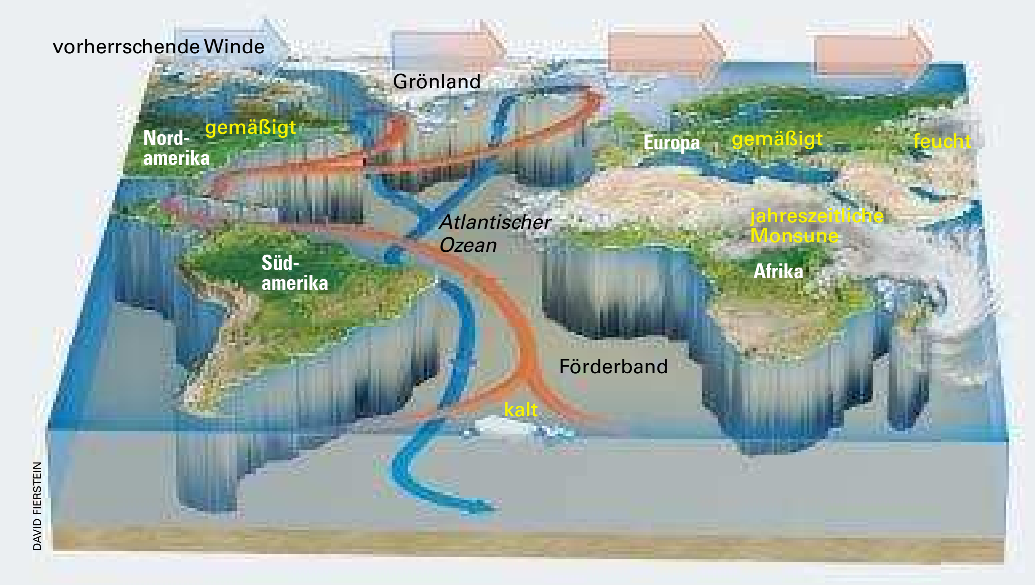
Durch trockenere Sommer würde sich eine zunächst relativ harmlose Dürre wahrscheinlich verschlimmern und ▷

Kritische Schwellenwerte

Durch die globale Erwärmung ändern sich die Umweltbedingungen ganz allmählich. Doch auch solch ein langsamer, stetiger Wandel kann klimawirksame Faktoren wie das Muster der Meeresströmungen oder die Niederschlagsverteilung bis zu einem Punkt treiben, an dem sie plötzlich in einen anderen Zustand springen. Die Folge ist ein abrupter Klimaumschwung – mit potenziell verheerenden Konsequenzen für Menschen und Gesellschaften. Hat ein klimawirksamer Faktor einmal die kritische Schwelle überschritten, können die resultierenden Veränderungen Jahrtausende anhalten. Viele solche Schwellen bleiben noch zu entdecken; die drei rechts aufgeführten wurden schon identifiziert.

Durch Schmelzwasser ausgelöster Kälteeinbruch

Wenn sich die Erde auf Grund des menschengemachten Treibhauseffekts immer mehr erwärmt, könnte der Zustrom an Schmelzwasser von der grönländischen Eisdecke und anderen Gletschern im subarktischen Bereich das so genannte nordatlantische Förderband lahm legen: das System von Meeresströmungen, das Wärme nach Europa transportiert und auch das



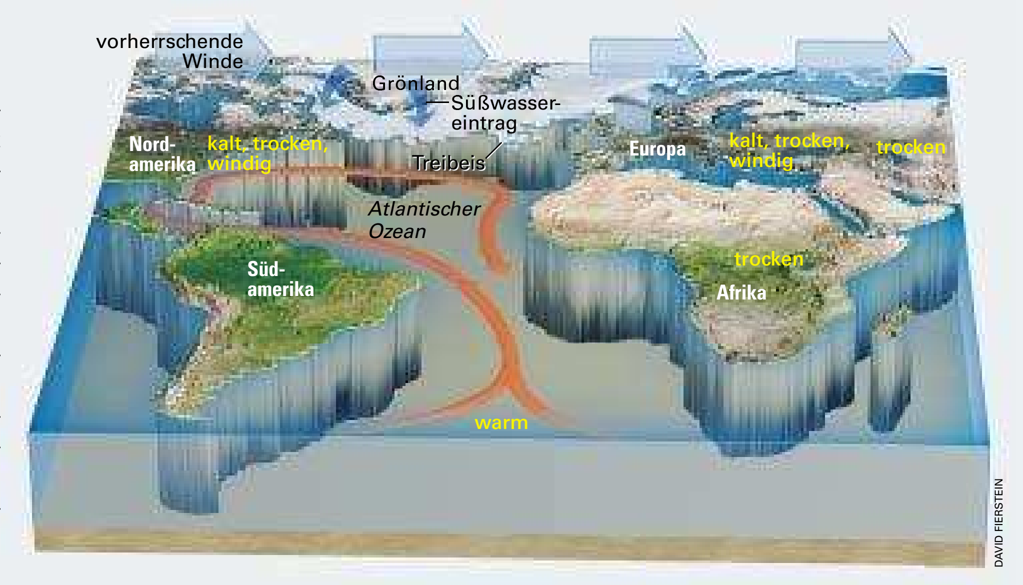
Förderband an: Stark salzhaltiges Meerwasser (rot), das von den Tropen nach Norden strömt, erwärmt die vorherrschenden Westwinde (dicke Pfeile), die von Nordamerika nach Europa wehen. Während es sich dabei abkühlt, nimmt seine Dichte weiter zu, sodass es bei Grönland schließlich absinkt. Es wandert dann am Meeresboden entlang Richtung Süden (blau); zum Ausgleich strömt an der Oberfläche weiteres warmes Wasser vom Süden heran.

Konsequenzen für das Klima: Das nordatlantische Förderband beschert großen Teilen Europas und Nordamerikas ein gemäßigtes Klima mit verhältnismäßig warmen Wintern. Dadurch ermöglicht es eine ergiebige landwirtschaftliche Produktion. Regelmäßige jahreszeitliche Monsunregen sorgen für Wachstumsphasen in weiten Gebieten Afrikas, Süd- und Ostasiens. Zentralasien ist feucht, der Südatlantik dagegen kalt und die Antarktis eisig.

klimawirksamer Faktor	Schwellenüberschreitung	resultierender Klimaumschwung	soziale Konsequenzen
Meeresströmungen im Nordatlantik transportieren Wärme aus den Tropen nach Norden und sorgen so für milde Winter in Westeuropa (siehe unten stehenden Kasten).	Eine Verringerung des Salzgehalts im Oberflächenwasser weit im Norden verlangsamt diese Strömungen und bringt sie vielleicht sogar zum Stillstand.	Die Temperaturen in Europa und im Osten der USA sinken ab, sodass sich das Klima dort dem von Alaska annähert.	Weltweit leidet die Landwirtschaft, und wichtige Schifffahrtsrouten werden durch Eis blockiert.
Regenwasser, das durch Pflanzen recycelt (von den Wurzeln aufgenommen und durch Verdunstung von den Blättern in die Luft zurückgeführt) wird, ist für einen Großteil des Niederschlags in den Getreidegürteln der Erde verantwortlich.	Eine mäßige Dürre lässt Pflanzen welken oder absterben. Infolgedessen versiegt der recycelte Regen, sodass die Trockenheit in einem Teufelskreis zunimmt.	Eine anfangs leichte Trockenperiode verstärkt sich und entwickelt sich zu einer lang anhaltenden Dürre.	Auf dem ausgedörrten Land gedeihen keine Feldfrüchte mehr. Die verbliebenen Nahrungsmittel auf dem Weltmarkt verteuern sich, und wer sie nicht mehr bezahlen kann, muss hungern.
Strömungen im Pazifischen Ozean bestimmen die großräumige Temperaturverteilung an der Meeresoberfläche, die wiederum über das regionale Wettergeschehen entscheidet.	Natürliche Phänomene wie El Niño verursachen aus noch unbekannten Gründen leichte Temperaturschwankungen an der Meeresoberfläche.	Das Wettergeschehen auf angrenzenden Kontinenten verändert sich. Es kommt zu schweren Stürmen oder Trockenperioden in Regionen, die normalerweise nicht davon betroffen sind.	Ackerland trocknet teilweise aus. Die Stürme verursachen großräumige schwere Schäden.

Klima in anderen Gebieten stark beeinflusst. Bei einem Stillstand oder auch nur einer deutlichen Verlangsamung dieser großräumigen Wasserzirkulation würde sich die Nordatlantikregion abkühlen, selbst wenn die Temperaturen global weiter ansteigen. Andere unübersehbare Klimaänderungen wären die fast sichere Folge.

Förderband aus: Wenn sehr viel Süßwasser in den Nordatlantik gelangt, verdünnt es das von Süden heranströmende salzige Oberflächenwasser so stark, dass es nicht mehr dicht genug ist um abzusinken, egal wie kalt es wird. Das Förderband kommt zum Stillstand oder verlangsamt sich zumindest. Die vorherrschenden Winde transportieren nun kühle Luft Richtung Osten (dicke Pfeile). Es kommt zu einer lang anhaltenden Kältewelle in Europa, die erst endet, wenn durch irgendwelche Faktoren erneut genug salzreiches Wasser aus dem Süden heranströmt, damit das Förderband wieder anspringt.



Konsequenzen für das Klima: Bei stillstehendem Förderband werden die Winter in großen Teilen Europas und Nordamerikas härter. Zugleich treten vermehrt Dürren auf. Unter Trockenheit leiden auch diejenigen Teile Afrikas und des Fernen Ostens, die normalerweise mit jahreszeitlichen Monsunregen rechnen können. Kräftiger Wind verschärft die Situation. Zentralasien wird trockener und erlebt öfter schwere Stürme. Viele Regionen der Südhalbkugel erwärmen sich deutlich.

Wann kippt das Klima?



Balanceakt: In der Regel herrscht auf der Erde jahrtausendelang ein bestimmtes Klima. Doch dann – zu einem Zeitpunkt, der so gut wie nicht vorhersagbar ist – neigt sich ein Aspekt des komplexen Klimasystems zu sehr in eine Richtung, und der Planet schlittert in einen völlig anderen klimatischen Zustand.

Bisher gibt es keine glaubwürdige Vorhersage eines plötzlichen Klimawandels, und es ist auch in naher Zukunft keine zu erwarten. Das liegt ganz einfach daran, dass schnelle Umschwünge viel schwieriger zu prognostizieren sind als allmähliche Veränderungen wie die globale Erwärmung.

Der Grund dafür hängt mit dem Wesen plötzlicher Veränderungen zusammen. Zu einem raschen Wechsel kommt es, wenn eine langsame, aber stetige Kraft wie die globale Erwärmung eine entscheidende Komponente des Klimasystems über einen Punkt hinausdrückt, von dem es kein direktes Zurück mehr gibt. Beim Überschreiten einer solchen Grenze springt das System in einen neuen Zustand – ähnlich, wie wenn Sie sich in einem Kanu zu sehr zur Seite lehnen und plötzlich in den See plumpsen. Es ist jedoch fast unmöglich, genau zu wissen, wie weit Sie das Boot kippen können, bis es kentert – insbesondere, wenn Wind und Wellen es schaukeln. Ebenso schwierig lässt sich zuverlässig erkennen, wann ein Klimaaspekt sich einer kritischen Schwelle nähert.

Forscher haben mit Computermodellen den Faktoren nachgespürt, die in der Nähe eines Wendepunkts am Werk sind. Das lieferte wichtige Erkenntnisse darüber, wodurch das Klimakanu geschaukelt wird, doch vieles ist noch immer unklar. Um festzustellen, wie genau die Computermodelle Klimaänderungen vorhersagen können, testen Wissenschaftler, wie gut ihre Programme bekannte Umstürze aus der Vergangenheit simulieren.

Viele Modelle ahmen die grundlegenden Typen früherer Klimaanomalien recht gut nach, reproduzieren also Kältephasen, Dürren oder Überflutungen verlässlich an den Orten und zu den Zeiten, die in Jahresschichten von Eiskernen und Sedimenten dokumentiert sind. Einige schaffen es sogar ansatzweise, feinere Details wie die Zugbahnen von Stürmen, das Windmuster oder die jahreszeitliche Niederschlagsverteilung wiederzugeben.

Doch selbst wenn die Modelle die allgemeine Natur der Klimaänderung richtig erfassen, bilden sie doch wichtige Parameter nur ungenügend ab. So waren die plötzlichen Umschwünge in der Vergangenheit gewöhnlich stärker und ausgedehnter, als aus den Simulationen hervorgeht. Viele Modelle unterschätzen zum Beispiel die Feuchtigkeitsmenge, die in der Sahara in den letzten Jahrtausenden verloren ging. Außerdem haben sie Schwierigkeiten damit, sowohl die hohen Temperaturen an den Polen zur Zeit der Dinosaurier als auch die extreme Kälte auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit zu reproduzieren.

Der einfachste Grund dafür könnte sein, dass die Modelle grundsätzlich weniger sensitiv sind als das Klima – etwa weil sie wesentliche Rückkopplungen und Nebeneffekte nicht berücksichtigen. Vielleicht beruhen die Diskrepanzen aber auch auf dem Einfluss von Klimaschwellen, die bisher niemand in Betracht gezogen hat. Sie zu ermitteln wäre zweifellos hilfreich und würde wohl noch mehr potenzielle Ursachen eines plötzlichen Klimawechsels aufdecken. Im günstigen Fall könnte sich aber auch erweisen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Umschwungs doch geringer ist als gedacht oder dass eine Veränderung die andere kompensiert.

▷ über Jahrzehnte oder länger andauern. Die Getreidegürtel haben nämlich eine Achillesferse: Der Niederschlag dort stammt gewöhnlich nicht aus neuer Feuchtigkeit, die der Wind von anderswo heranträgt, sondern aus einem lokalen Regen-Recycling. Die Pflanzen nehmen mit ihren Wurzeln Wasser auf, das andernfalls durch den Untergrund in Flüsse sickern und ins Meer abfließen würde. Ein Teil dieser Feuchtigkeit geben sie dann durch Verdunstung über die Blätter an die Luft zurück. Werden die Sommer jedoch trockener, welken die Pflanzen und sterben möglicherweise ganz ab, wodurch weniger Wasser zurück in die Atmosphäre gelangt. Die kritische Schwelle wird überschritten, wenn die Pflanzenpopulation so stark schrumpft, dass die in den Kreislauf zurückgeführte Regenmenge nicht mehr ausreicht, die Population am Leben zu erhalten. Dann sterben weitere Pflanzen, und der Niederschlag geht noch mehr zurück. Ein Teufelskreis ähnlich dem, der die Sahara vor 5000 Jahren in eine Wüste verwandelte, kommt in Gang (Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 21).

Bisher konnten die Wissenschaftler erst wenige Schwellen identifizieren, deren Überschreiten regionale Klimaänderungen auslösen würde. Wahrscheinlich gibt es viel mehr. Diese Wissenslücke ist beunruhigend; denn die Menschheit macht vieles, was das Klima aus dem Gleichgewicht bringen könnte. Tanzen in einem Kanu empfiehlt sich gewöhnlich nicht. Dennoch tanzen wir. Wir ersetzen Wälder durch Ackerland, das mehr Sonnenlicht reflektiert. Wir pumpen Wasser aus dem Boden, sodass sich der Grundwasserspiegel absenkt. Wir ändern den Gehalt der Atmosphäre an Spurengasen und Schwebteilchen, was die irdische Strahlungsbilanz sowie die Eigenschaften der Wolken beeinflusst.

Sich für die Zukunft wappnen

Die negativen Folgen eines größeren Klimaumschwungs lassen sich mildern, wenn er allmählich abläuft oder erwartet wird. Landwirte, die mit einer Dürre rechnen, können Brunnen bohren oder zu Getreidesorten wechseln, die weniger Wasser benötigen. Schlimmstenfalls verkaufen sie ihren Besitz und ziehen weg. Unvorhergesehene Veränderungen je-

doch können verheerend sein. Ein einziges überraschendes Dürrejahr ruiniert bereits Landwirte, die am Rande des Existenzminimums stehen, oder verursacht in Entwicklungsländern mit Subsistenzlandwirtschaft eine Hungersnot. Wenn sich die unerwartete Dürre in die Länge zieht, sind weitere Bevölkerungsteile auch in hoch entwickelten Staaten betroffen. Leider lässt sich derzeit noch kaum vorhersagen, wann plötzliche Klimasprünge eintreten und wie sie sich insgesamt auswirken (Kasten auf der Seite gegenüber).

Das liegt auch daran, dass sich die große Mehrheit der Klimaforscher und Politiker nur um die allmählichen Veränderungen im Zuge der globalen Erwärmung kümmert. Dabei steht die Forderung nach einer Reduktion der Kohlendioxidemissionen im Mittelpunkt. Zwar dürfte ein verringerter Ausstoß von Treibhausgasen zur Stabilisierung des Klimas beitragen, doch genügt er vielleicht nicht oder wird von anderen Faktoren überkompensiert. Deshalb sollte man auch die Gefahr plötzlicher Veränderungen in Blick behalten. Natürlich könnten wir uns einfach dazu entschließen, diese Möglichkeit zu ignorieren und zu hoffen, dass nichts passiert oder wir auch mit Extremsituationen fertig werden. Diese Vogel-Strauß-Politik hat zwar die Titanic zum Sinken gebracht, aber viele andere Schiffe haben den Nordatlantik schließlich unversehrt überquert. Klugerweise sollten wir jedoch der Gefahr ins Auge sehen und Maßnahmen ergreifen, durch die sich der Einfluss des Menschen auf das Klima in einer Weise verringert, dass eine katastrophale Veränderung unwahrscheinlich wird. Die globale Erwärmung zu zügeln wäre ein Schritt in die richtige Richtung. Aber andere Maßnahmen sollten hinzukommen. Welche am sinnvollsten sind, kann nur die weitere Erforschung von Klimaschwellen und ihrer Sensibilität gegenüber menschlichen Aktivitäten zeigen.

Der Nationale Forschungsrat *(National Research Council)* der USA schlägt außerdem vor, sich beizeiten Handlungsspielräume zu schaffen, um mit einem plötzlichen Klimawandel umzugehen. In seinem Bericht betont er die Bedeutung einer flexiblen Strategie und verweist auf die Geschichte Grönlands als lehrreiches Beispiel. Die dort siedelnden Wikinger gingen zu Grunde oder wanderten aus, als ihnen ihr Lebensstil mit Beginn der Kleinen Eiszeit nur noch ein karges oder gar kein Auskommen mehr bot. Ihre Nachbarn, die Thule-Eskimos, hingegen passten sich an und überlebten an Ort und Stelle. Tatsächlich wäre es nur mit geringen oder gar keinen Kosten verbunden, Pläne zu entwickeln, die helfen, eine hereinbrechende Krise zu meistern. Zum Beispiel könnten Kommunen schon jetzt Bäume pflanzen, die während einer plötzlichen Dürreperiode mit stürmischen Winden den Boden festhalten. Und sie könnten sich schon jetzt einigen, wer Zugang zu welchen Wasservorräten bekommt, wenn diese Ressource knapp wird.

Derzeit sieht es so aus, als ob die Menschheit nicht aufhört, das Boot zu schaukeln und dabei gewisse Klimafaktoren näher an die Grenzen zu schieben, an denen das System kippt. Auch wenn es keine neue Eiszeit oder andere weltweite Katastrophe gäbe, die der Fantasie der Drehbuchautoren Konkurrenz machen würde, wären die Folgen schlimm genug. Es lohnt sich deshalb zu überlegen, wie wir uns gegen die potenziellen Folgen eines plötzlichen Klimawechsels wappnen oder – noch besser – das Kentern des Klimakanus von vornherein verhindern könnten. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Richard B. Alley ist Professor für Geowissenschaften an der Pennsylvania State University und Mitglied des dortigen Zentrums für Erdsystemforschung. Er verbrachte drei Forschungsaufenthalte in der Antarktis und fünf in Grönland. Dort half er beim Ziehen der Eiskerne, die Aufschluss über die Geschichte des Erdklimas in den letzten 110000 Jahren geben. 2001 erhielt er den Wissenschaftspreis »Phi Beta Kappa« für sein allgemein verständliches Sachbuch »The Two-Mile Time Machine«, in dem er die grönländischen Bohrkerne, die aneinander gelegt mehr als zwei Meilen lang sind, für eine Zeitreise in die Vergangenheit nutzt.

Rapid climate change. Von Spencer Weart in: The discovery of global warming. Harvard University Press, 2003

Global climatic impacts of a collaps of the atlantic thermohaline circulation. Von Michael Vellinga und Richard A. Wood in: Climatic Change, Bd. 54, S. 251, August 2002

Abrupt climate change: inevitable surprises. Vom Committee on Abrupt Climate Change des National Research Council. National Academy Press, 2002

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Vom Größeren zum Kleineren: In der Anfangszeit des Universums haben Riesengalaxien Unmengen von Sternen sowie zentrale Schwarze Löcher extrem hoher Masse hervorgebracht, sodass sie als Quasare gleißend hell erstrahlten (links). Nach etwa der Hälfte der 14 Milliarden Jahre, die seit dem Urknall vergangen sind, verlagerte sich die Aktivität in Spiralgalaxien mittlerer Größe (Mitte). In der Zukunft werden Zwerggalaxien mit wenigen Millionen Sternen zu Schauplätzen kosmischer Aktivität.

Die Midlife-Crisis des Kosmos

Die Sturm-und-Drang-Zeit des Universums ist vorbei – doch zur Ruhe gesetzt hat es sich noch lange nicht. Wir leben in einer relativ moderaten Phase der kosmischen Entwicklung, in der Sterne und Schwarze Löcher in erstaunlich großer Zahl entstehen.

Von Amy J. Barger

ALFRED T. KAMAJIAN

Bis vor Kurzem glaubten die meisten Astronomen, das Universum befinde sich gegenwärtig in einer langweiligen Epoche, die sich erheblich von der Frühzeit des Kosmos unterscheide. Nach dieser traditionellen Vorstellung sollte es in den ersten sechs Milliarden Jahren nach dem Urknall äußerst stürmisch im All zugegangen sein: Galaxien kollidierten und verschmolzen miteinander, mächtige Schwarze Löcher sogen in gewaltigen Strudeln Materie in sich hinein, Sterne entstanden wie in einem kosmischen Feuerwerk. In den darauf folgenden acht Milliarden Jahren hingegen wurden Zusammenstöße von Galaxien seltener, die gigantischen Schwarzen Löcher kamen zur Ruhe und die Sternentstehung reduzierte sich auf ein schwaches Flackern. Viele Astronomen waren davon überzeugt, dass die Menschheit in einem reifen Universum lebe und dass die Zukunft nichts weiter zu bieten habe als die unaufhaltsame Expansion eines gemächlich alternden Kosmos.

In den letzten Jahren allerdings zeigte sich, dass die Berichte vom Niedergang der kosmischen Aktivität maßlos übertrieben waren. Mit Hilfe neuer Weltraumteleskope und moderner Detektoren an irdischen Großobservatorien stießen die Astronomen auch in nahen Galaxien und damit in der jüngsten Vergangenheit auf heftige Aktivität. (Das Licht von fernen Galaxien braucht länger, um uns zu erreichen, deshalb sehen wir diese Sternsysteme in einem früheren Stadium ihrer Entwicklung.) Durch Analyse der Röntgenstrahlung, die von den Zentralgebieten dieser relativ nahe gelegenen Galaxien ausgesendet wird, konnten die Forscher viele extrem massereiche Schwarze Löcher aufspüren, die immer noch Gas und Staub aus ihrer Umgebung verschlingen. Zudem zeigte eine im Optischen durchgeführte genauere Untersuchung von Galaxien unterschiedlichen Alters, dass die Sternentstehungsrate keineswegs so schnell abgesunken ist wie zuvor angenommen.

So hat sich inzwischen die Auffassung durchgesetzt, dass das frühe Universum von einigen wenigen Riesengalaxien mit kolossalen Schwarzen Löchern und gewaltigen Sternentstehungsausbrüchen dominiert wurde, die Gegenwart sich indes weit vielfältiger präsentiert: Die Entstehung neuer Sterne und der Einfall von Materie in Schwarze Löcher lässt sich nun in einer großen Zahl von Galaxien mittlerer und kleiner Größe beobachten. Wir befinden uns demnach mitten in einer Phase, in der die kosmische Aktivität auf kleinere Systeme umverteilt wird.

Blick zurück in die Vergangenheit

Um ein zusammenhängendes Bild der kosmischen Geschichte zu erhalten, müssen die Astronomen zunächst einmal die erstaunlich große Menge an Objekten verstehen, die sie beobachten. Die lichtschwächsten Galaxien sind auf Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops zu sehen, die jeweils zehn Tage lang belichtet wurden: Das »Hubble Deep Field North« und das »Hubble Deep Field South« zeigen in zwei winzigen Ausschnitten des nördlichen beziehungsweise südlichen Sternenhimmels Tausende von fernen Galaxien, von denen die ältesten schon rund eine Milliarde Jahre nach dem Urknall aufleuchteten. Eine neuere Langzeitaufnahme, das »Hubble Ultra Deep Field«, hat Galaxien in einem noch jüngeren Stadium nachgewiesen.

Aber solche »tiefe« Aufnahmen, wie die Astronomen sagen, sind erst der Anfang. Die Wissenschaftler wollen verstehen, wie sich aus den ältesten und fernsten Strukturen die heutigen Galaxien entwickelt haben. Es ist ein wenig mit der Aufgabe vergleichbar, herauszufinden, wie ein menschliches Baby zu einem Erwachsenen wird.

Ein erster großer Schritt, die Gegenwart mit der Vergangenheit zu verbinden, ist das Ermitteln der dritten Dimension: Welche der vielen tausend Galaxien auf den tiefen Aufnahmen befinden sich im Vordergrund, welche sind weiter entfernt? Üblicherweise geschieht dies über die Messung der Rotverschiebung im Spektrum der Galaxien. Die Expansion des Kosmos streckt das Licht der fernen Quellen auf seinem Weg zu uns und verschiebt so seine Wellenlängen zum roten Ende des Spektrums. Je stärker das Licht rotverschoben ist, desto weiter ist also die Quelle entfernt und desto älter ist sie auch.

Eine Rotverschiebung von 1 beispielsweise bedeutet eine Streckung der Wellenlängen um 100 Prozent, also auf die doppelte Länge. Das Licht eines Objekts mit dieser Rotverschiebung wurde etwa sechs Milliarden Jahre nach dem Urknall ausgesendet, das ist weniger als die Hälfte des gegenwärtigen Alters des Kosmos. Die Astronomen geben aber meist nicht das Alter an, sondern die Rotverschiebung, weil diese direkt gemessen wird.

Eigentlich ist die Bestimmung der Rotverschiebung eine narrensichere Methode, um die kosmische Geschichte zu rekonstruieren. Doch in den tiefsten der tiefen Aufnahmen ist es nahezu unmöglich, die Rotverschiebung aller Galaxien zu ermitteln. Ein Grund dafür ist deren riesige Anzahl. Doch noch problematischer ist ihre geringe Helligkeit: Im Mittel fällt auf jeden Quadratzentimeter des Teleskopspiegels pro Minute nur ein Photon. Zudem verteilt das Beugungsgitter des Spektrografen das Licht über eine größere Fläche des Detektors und schwächt das Signal so bei allen Wellenlängen noch mehr.

In den späten 1980er Jahren entwickelte ein Team um Lennox L. Cowie von der Universität von Hawaii und Simon J. Lilly – jetzt an der ETH Zürich – eine neue Methode, bei der die mühsame Bestimmung von Rotverschiebungen entfällt. Die Forscher beobachteten ausgewählte Himmelsabschnitte in jeweils schmalen Bereichen des ultravioletten, grünen und roten Teils des elektromagnetischen Spektrums und bestimmten daraus, wie hell die Galaxien in diesen

IN KÜRZE

- In der **Frühzeit des Kosmos** ging es äußerst turbulent zu: Galaxien kollidierten, Sterne entstanden wie in einem gigantischen Feuerwerk, und Schwarze Löcher verschlangen Materie von mehreren Millionen Sonnenmassen.
- Die Astronomen glaubten, die **stürmische Phase des Universums** sei lange vorbei. Doch neue Beobachtungen enthüllten aktive, Gas verschlingende Schwarze Löcher und große Sternentstehungsgebiete in nahen Galaxien.
- Diese Befunde weisen auf eine Art **kosmischer Gesundschrumpfung** hin: Während das frühe Universum von einer relativ kleinen Zahl von Riesengalaxien dominiert wurde, verteilt sich die Aktivität im heutigen Kosmos auf eine Vielzahl kleinerer Galaxien.

Entwicklung des Universums

Ein Blick in die Tiefe des Alls ist zugleich ein Blick in die Vergangenheit. Denn das Licht ist umso länger zur Erde unterwegs, je weiter die Strahlungsquellen von ihr entfernt sind. Vor über 10,5 Milliarden Jahren dominierten Riesengalaxien das Universum. Sie verschmolzen miteinander und lösten dadurch wahre Kaskaden an Sternentstehungsprozessen aus und führten massereichen Schwarzen Löchern Unmengen an Gas zu. Nach und nach verlagerte sich die Sternentstehung in die Arme von Spiralgalaxien, und die Schwarzen Löcher in deren Zentren wuchsen weiter. Im heutigen Universum entstehen Sterne überwiegend in kleinen Spiral- und irregulären Galaxien, während größere Sternsysteme zur Ruhe gekommen sind.

vor 10,5 Milliarden Jahren

vor 8 Milliarden Jahren

heute

Milchstraßensystem

ALFRED T. KAMAJIAN

Wellenlängenbereichen sind (siehe Kasten auf S. 55). Eine nahe Galaxie, in der Sterne entstehen, ist in allen drei Spektralbereichen ähnlich hell. Aber ihr Licht weist knapp außerhalb des UV-Bands, bei einer Wellenlänge von etwa 91,2 Nanometern, eine scharfe Kante auf. (Ursache dafür ist der neutrale Wasserstoff in der Umgebung der Galaxie, der Licht mit kürzeren Wellenlängen absorbiert.) Da das Licht ferner Galaxien rotverschoben ist, verschiebt sich auch diese Kante zu längeren Wellenlängen. Ist die Rotverschiebung groß genug, so sieht man die Galaxie im ultravioletten Bereich nicht mehr. Noch größere Rotverschiebungen lassen die Galaxie auch im grünen Wellenlängenbereich verschwinden.

Auf diese Weise konnten Cowie und Lilly Galaxien mit aktiver Sternentstehung in Rotverschiebungsintervalle einteilen und erhielten somit ein grobes Maß für ihr Alter. 1996 nutzte Charles C. Steidel vom California Institute of Technology in Pasadena diese Methode, um Hunderte von Galaxien mit Rotverschiebungen um den Wert 3 herum zu erfassen (was einer Zeit von etwa zwei Milliarden Jahren nach dem Urknall entspricht). Anschließend wurden mit dem 10-Meter-Keck-Teleskop auf dem Mauna Kea auf Hawaii lang belichtete Spektren aufgenommen, um daraus genaue Werte für die Rotverschiebung zu ermitteln.

Weißt du, wieviel Stern' entstehen

Mit diesem Maß für die Entfernung lässt sich nun die Geschichte der Sternentstehung im Kosmos rekonstruieren. In nahen Galaxien, so fanden die Astronomen heraus, haben von den gleichzeitig entstehenden Sternen in der Regel viele eine geringe und wenige eine sehr große Masse: Auf zwanzig sonnenähnliche Sterne kommt nur einer mit dem Zehnfachen der Sonnenmasse. Massereiche Sterne senden vor allem ultraviolettes und blaues Licht aus, während Sterne niedriger Masse gelb und rot leuchten. Wenn die Rotverschiebung einer fernen Galaxie bekannt ist, können die Astronomen ihr intrinsisches Spektrum – also das unverschobene Spektrum im Ruhesystem der Galaxie – berechnen. Aus dem Anteil an ultravioletter Strahlung in diesem Spektrum lässt sich wiederum die Anzahl von massereichen Sternen in der Galaxie abschätzen.

Da massereiche Sterne ihren Brennstoff bereits nach wenigen Dutzend Millionen Jahren aufgebraucht haben, was nach galaktischen Maßstäben eine sehr kurze Lebenszeit ist, eignet sich ihre Anzahl als Indikator für die Sternentstehungsrate ihrer Heimatgalaxie: Sinkt diese Rate, dauert es nicht lange, bis die Anzahl massereicher Sterne ebenfalls schwindet. Im Milchstraßensystem, das sich nicht wesentlich von anderen Spiralgalaxien in unserer kosmischen Nachbarschaft unterscheidet, beträgt die Sternentstehungsrate demnach nur wenige ▷



▷ Sonnenmassen pro Jahr. In Galaxien mit hoher Rotverschiebung hingegen ist der Wert zehnmal so groß.

Als Cowie und Lilly die Sternentstehungsraten aller von ihnen beobachteten Galaxien berechneten, kamen sie zu dem bemerkenswerten Schluss, dass das Universum bei einer Rotverschiebung von 1 geradezu einen Babyboom erlebt hat. 1996 wendete Piero Madau, jetzt an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz tätig, die Technik auf die Daten des nördlichen Hubble Deep Fields an. Für dieses Areal liegen präzise Messungen der Strahlungsintensität in vier Wellenlängenbereichen vor, deshalb eignet es sich besonders gut für das Verfahren. Madau kombinierte seine Ergebnisse mit bereits vorhandenen Beobachtungsdaten bei geringen Rotverschiebungen, um die Veränderungen der Sternentstehungsrate im Laufe der kosmischen Entwicklung besser abzuschätzen. Er fand heraus, dass die Sternentstehung vier bis sechs Milliarden Jahre nach dem Urknall einen Höhepunkt durchlaufen hat. Das überzeugte viele Astronomen davon, dass das Universum seine besten Zeiten bereits lange hinter sich hat.

Eine staubige Angelegenheit

Madaus Analyse stellt zwar einen Meilenstein dar, ist aber dennoch nur ein Teilerfolg. Mit optischen Teleskopen durchgeführte Durchmusterungen des Himmels nach Galaxien können nämlich nicht alle Strahlungsquellen im frühen Universum aufspüren. Für sehr ferne Galaxien wird die Rotverschiebung so groß, dass die als ultraviolettes und optisches Licht ausgesandte Strahlung für den Beobachter im infraroten Bereich des Spektrums verschwindet. Zudem ist ein Großteil der Sterne in Staubwolken eingebettet, die von Supernova-Explosionen und anderen Prozessen stammen. Der Staub absorbiert das Sternenlicht, heizt sich auf und strahlt die Energie im fernen Infrarot wieder ab – und die Expansion verschiebt diese langwellige Strahlung weiter in den Submillimeter-Bereich. Deshalb ist eine helle Submillimeter-Quelle oft ein Indiz für intensive Sternentstehung.

Bis vor Kurzem waren Beobachtungen im Submillimeter-Bereich mit Teleskopen am Erdboden noch problematisch. Einer der Gründe dafür ist, dass der Wasserdampf in der Atmosphäre Strahlung dieser Wellenlängen absorbiert. Eine neue Spezialkamera, das Submillimeter Common-User Bolometer Array (Scuba), die 1997 am James-Clerk-Maxwell-Teleskop auf dem Mauna Kea installiert wurde, hat diese Schwierigkeiten jedoch verringert. Mit einer Höhe von 4000 Metern über dem Meeresspiegel lässt die Sternwarte auf dem Mauna Kea bereits 97 Prozent des Wasserdampfs in der Atmosphäre unter sich zurück.

Mehrere Forscherteams haben Scuba inzwischen genutzt, um große Himmelsareale nach fernen, außergewöhnlich hellen Strahlungsquellen zu durchforschen, die hinter Staubwolken verborgen liegen. Da die Auflösung von Scuba gering ist, erscheinen die Galaxien auf den Bildern nur als unscheinbare Flecken (siehe Foto unten). Selbst mit Belichtungszeiten von mehreren Stunden vermag Scuba nur wenige dieser Quellen zu entdecken – doch diese seltenen Objekte zählen zu den leuchtkräftigsten Galaxien im Kosmos. Vor dem Einsatz von Scuba wussten die Astronomen nicht einmal, dass es diese gleißenden Galaxien gibt! Die Sternentstehungsrate in ihnen übertrifft jene in den heutigen Galaxien um das Mehrhundertfache – ein weiterer Hinweis darauf, dass es zu früheren Zeiten erheblich lebhafter im Universum zuging als heute.

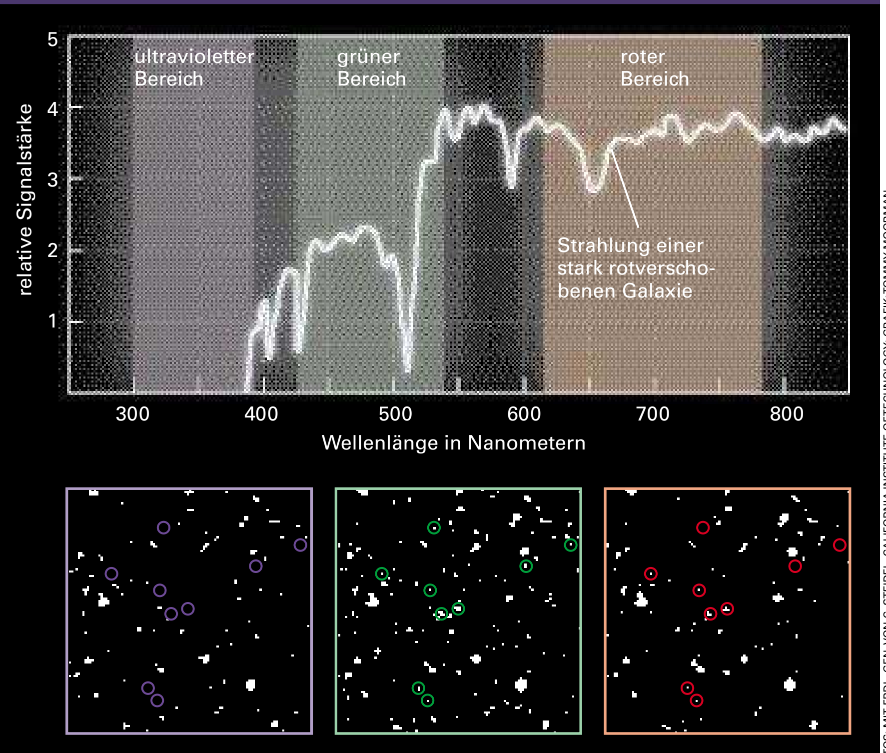
All diese verborgenen Sternentstehungsregionen aufzuspüren, war sicherlich eine revolutionäre Entdeckung. Doch stellt sich nun die Frage, ob das Universum nicht noch andere Aktivitäten vor uns verbirgt. Zum Beispiel könnten Gas- und Staubmassen innerhalb von Galaxien die Strahlung abschirmen, die von Akkretionsscheiben um Schwarze Löcher mit dem Milliardenfachen der Sonnenmasse ausgeht. Solche wirbelnden Materiescheiben sind vermutlich die »Kraftwerke« der Quasare, jener erstaunlich hellen Objekte mit großen Rotverschiebungen, sowie der aktiven Kerne vieler naher Galaxien. Optische Untersuchungen in den 1980er Jahren wiesen darauf hin, dass es einige Jahrmilliarden nach dem Urknall erheblich mehr Quasare gab als aktive Galaxienkerne im heutigen Universum. Da

A. J. BARGER, L. L. COWIE, D. B. SANDERS, E. FULTON ET AL. / JCMT

◀ **Extrem leuchtkräftige Galaxien im frühen Universum haben die Astronomen mit dem Submillimeter Common-User Bolometer Array (Scuba) am James-Clerk-Maxwell-Teleskop auf dem Mauna Kea in Hawaii entdeckt. Der helle Fleck links im Bild ist vermutlich eine alte, staubumhüllte Galaxie, in der mit einer enormen Rate von über tausend Sonnenmassen pro Jahr neue Sterne entstehen.**

So findet man alte Galaxien

Um auf effektive Weise die ältesten Galaxien in einem Himmelsareal aufzuspüren, setzen die Astronomen bei ihren Beobachtungen Filter ein, die jeweils nur den ultravioletten, den grünen und den roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums durchlassen. Die Expansion des Weltalls hat das Licht der ältesten Galaxien zu größeren Wellenlängen, also zum roten Ende des Spektrums hin verschoben. Die Grafik (oben) zeigt, wie eine hohe Rotverschiebung von etwa 3 die Strahlung einer fernen Galaxie vom ultravioletten in den roten Bereich verschiebt. Deshalb sind alte Galaxien auf den Aufnahmen im roten und im grünen Bereich zu sehen, nicht jedoch im ultravioletten (Bildreihe unten).



FOTOS: MIT FRDL. GEN. VON C. STEIDEL, CALIFORNIA INSTITUTE OFTECHNOLOGY; GRAFIK: TOMMY MOORMAN

die extrem massereichen Schwarzen Löcher nicht einfach verschwinden können, vermuteten die Astronomen, dass viele nahe Galaxien erloschene Quasare enthalten – Schwarze Löcher, denen der Brennstoff ausgegangen ist.

Solche untätigen extrem massereichen Schwarzen Löcher konnten tatsächlich anhand ihrer Schwerkraftwirkung nachgewiesen werden. Sterne und Gaswolken kreisen nämlich weiterhin um die Schwerezentren, auch wenn keine Materie mehr in sie hineinfällt. Sogar im Zentrum unseres Milchstraßensystems gibt es ein Schwarzes Loch, das zur Zeit nicht aktiv ist.

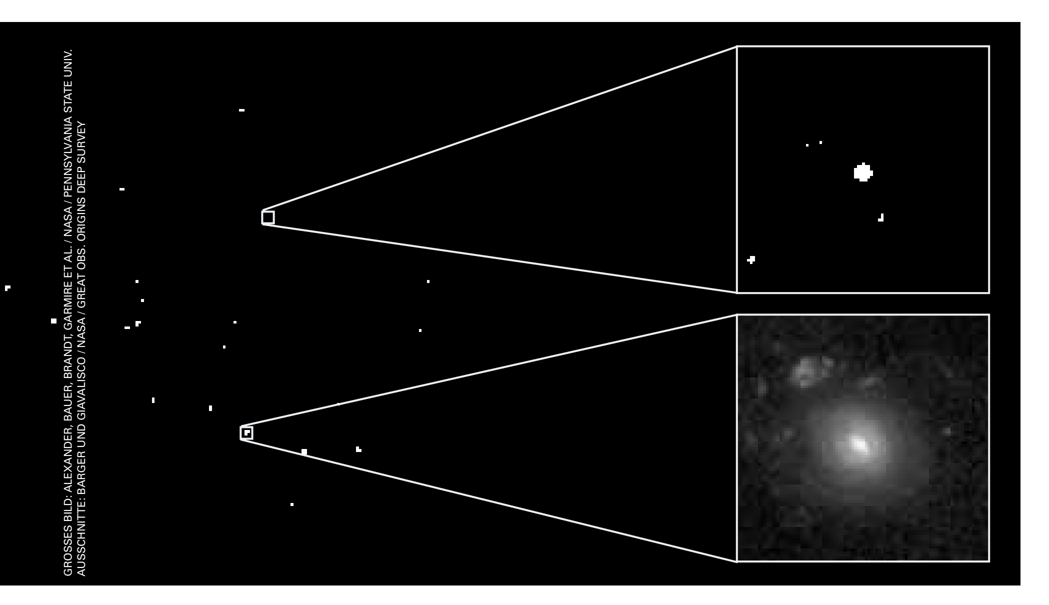
Anhand dieser Entdeckungen entwarfen die Astronomen folgendes Szenario: Die meisten extrem massereichen Schwarzen Löcher entstanden in der Ära der Quasare und konsumierten in einem gewaltigen Wachstumsschub alle Materie in ihrer Umgebung. Als der Materienachschub stockte, entzogen sie sich der optischen Beobachtung. Wie die Sternentstehung wäre demnach auch die Aktivität der Quasare in erster Linie ein Phänomen der fernen Vergangenheit – ein drittes Anzeichen dafür, dass wir in vergleichsweise langweiligen Zeiten leben.

Doch dieses Szenario ist unvollständig. Darum überprüfen die Astronomen gegenwärtig, ob tatsächlich die meisten Quasare seit Langem erloschen sind, indem sie Beobachtungen im Röntgen- und im optischen Bereich kombinieren. Röntgenstrahlung vermag nämlich die Gas- und Staubwolken zu durchdringen, hinter denen sich die Schwarzen Löcher verbergen. Da die irdische Atmosphäre Röntgenstrahlen absorbiert, muss man allerdings auf Weltraumteleskope wie Chandra und XMM-Newton zurückgreifen, um die verborgene Aktivität der Schwarzen Löcher nachzuweisen (Spektrum der Wissenschaft, 5/2002, S. 22).

Massereiche Schwarze Löcher vor unserer kosmischen Haustür

Gemeinsam mit Cowie, Richard F. Mushotzky vom Goddard-Raumfahrtzentrum der Nasa, und Eric A. Richards, der damals an der Arizona State University forschte, wählte ich im Jahr 2002 ein Himmelsareal aus, das Chandra durchmustert hatte. Mit dem Subaru-Teleskop auf dem Mauna Kea konnten wir an der Position von zwanzig Röntgenquellen auch im Optischen Objekte nachweisen. Anschließend nahmen wir mit dem Zehn-Meter-Spiegel des Keck-Teleskops Spektren dieser Objekte auf, um die Rotverschiebung zu bestimmen. Das Ergebnis überraschte uns: Viele der aktiven extrem massereichen Schwarzen Löcher, die Chandra entdeckt hatte, befinden sich in nahen, leuchtkräftigen Galaxien. Zwar hatten einige Astronomen aus dem Vorhandensein des Röntgenhintergrunds bereits geschlossen, es müsse eine Vielzahl verborgener extrem massereicher Schwarzer Löcher geben – aber niemand hätte erwartet, dass diese Objekte unmittelbar vor unserer kosmischen Haustür liegen. Die optischen Spektren vieler dieser Galaxien zeigten keinerlei Anzeichen für die Aktivität eines Schwarzen Lochs. Deshalb hätten die Astronomen diese Schwerkraftmonster in den Galaxienkernen niemals aufspüren können, wenn sie nicht Zugang zu dem Röntgenstrahlungsbereich hätten.

Diese Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass nicht alle extrem massereichen Schwarzen Löcher in der Quasar-Ära entstanden sind. Vielmehr dürften sie sich von den frühesten Zeiten bis heute angesammelt haben. Allerdings zeigen die heute noch aktiven extrem massereichen Schwarzen Löcher ein von den fernen Quasaren abweichendes Verhalten. Quasare sind gefräßige Monster, die Unmengen an Materie aus ihrer Umgebung verschlingen. Im Gegensatz dazu erscheinen die meisten der von Chandra aufgespürten Quellen als moderate Esser und ▷



Mit Hilfe von Röntgenaugen können die Astronomen verborgene Schwarze Löcher entdecken. Das Röntgenteleskop Chandra hat auf diese Weise viele der Energiemonster aufgespürt. Einige davon sind alte, helle Quasare, die bereits wenige Milliarden Jahre nach dem Urknall erstrahlten (oberes Detail). Andere jedoch verstecken sich in den Zentren relativ naher Galaxien (unteres Detail) und erzeugen auch in der heutigen Ära des Kosmos noch Röntgenstrahlung.

strahlen entsprechend weniger Energie ab. Bislang konnten die Forscher nicht herausfinden, worauf dieses so unterschiedliche Verhalten beruht. Steht den heutigen Schwarzen Löchern vielleicht weniger Gas als Nahrung zur Verfügung? Nahe Galaxien kollidieren seltener miteinander als es die fernen Sternsysteme im frühen Universum taten – und solche Zusammenstöße treiben neue Materie in die Galaxienzentren, geradewegs in den Schlund der Schwerkraftmonster.

Chandra stieß noch auf ein weiteres Rätsel: Die moderaten Röntgenquellen erzeugen nur etwa ein Hundertstel so viel Strahlung wie ihre älteren Gegenstücke; gleichwohl erreicht die Gesamtstrahlung aller moderaten Quellen zehn Prozent derjenigen aller Quasare früherer Epochen. Die einzige Erklärung für diesen Befund lautet: Die Anzahl der aktiven Schwarzen Löcher ist heute viel höher als diejenige der aktiven Quasare in der Vergangenheit. Anders ausgedrückt: Die Aktivität im Kosmos hat sich von einigen wenigen sehr hellen Objekten zu sehr vielen, aber lichtschwächeren Quellen hin verlagert. Obwohl die heutigen extrem massereichen Schwarzen Löcher also kleiner sind, ist ihre kombinierte Wirkung immer noch immens.

Die Galaxien mit Sternentstehungsgebieten haben einen vergleichbaren Wandel durchlaufen. Manche von ihnen, die in unserer Nähe liegen, weisen zwar ähnlich hohe Sternentstehungsraten auf wie die sehr leuchtkräftigen staubverdeckten Galaxien, die Scuba registriert hat. Doch die Anzahl solcher gleißenden Galaxien beträgt heute weniger als ein Vierhundertstel derjenigen im fernen Universum. Kleinere Galaxien haben auch hier einen Teil der Aktivität übernommen.

Anhand von hochwertigem Beobachtungsmaterial haben Cowie und ich gemeinsam mit Gillian Wilson, jetzt am Infrared Processing and Analysis Center der Nasa, und Doug J. Burke, jetzt am Harvard-Smithsonian-Zentrum für Astrophysik, die mittlere Leuchtkraftdichte im Kosmos neu abgeschätzt. Wir fanden, dass sich die Leuchtkraftdichte im optischen und im ultravioletten Bereich während der kosmischen Entwicklung kaum geändert hat. Die Sternentstehungsrate ist zwar in der zweiten Hälfte der seit dem Urknall verstrichenen Zeit zurückgegangen, da die gewaltigen, mit Staub durchzogenen Galaxien diesbezüglich zur Ruhe gekommen sind; die nahen Galaxien mit Sternentstehungsregionen sind jedoch so zahlreich, dass die Dichte der optischen und ultravioletten Strahlung insgesamt nur wenig abgenommen hat.

Noch längst nicht zum alten Eisen

Dieses neue Bild von einem nach wie vor agilen Universum fügt sich gut in die kosmologische Theorie ein. Neuere Computersimulationen lassen vermuten, dass die Verschiebung der Aktivität von einigen wenigen großen und hellen Galaxien zu vielen kleineren und zahmeren eine direkte Folge der kosmischen Expansion sein könnte. Durch die Ausdehnung des Kosmos vergrößern sich die Abstände zwischen den Galaxien, sodass Kollosionen und Verschmelzungen seltener werden. Zudem lässt sich das Gas zwischen den Galaxien umso leichter aufheizen, je weiter es sich zerstreut. Und da heißes Gas eine höhere kinetische Energie aufweist als kaltes, widersteht es stärker dem Schwerkrafteinfluss der Galaxien, sodass es nicht mehr so leicht in deren Nähe gerät. Fabrizio Nicastro vom Harvard-Smithsonian-Zentrum für Astrophysik und seine Koautoren haben vor Kurzem aufgeheizte intergalaktische Nebelschwaden entdeckt, die sich dadurch verraten, dass sie ultraviolettes Licht und Röntgenstrahlung von fernen Quasaren und aktiven Galaxien absorbieren. Dieser warme Dunstschleier umgibt unsere Galaxie in allen Richtungen und liegt innerhalb der »Lokalen Gruppe«, zu der das Milchstraßensystem, die Andromedagalaxie und dreißig kleinere Sternsysteme gehören. Vermutlich handelt es sich bei diesem Gas um Überreste der Galaxienentstehung, die zu warm sind, um sich zu weiteren Galaxien verdichten zu können.

Kleinere Galaxien könnten sich in kühleren Umgebungen befinden, da sie das umgebende Gas weniger stark aufheizen als die großen Galaxien mit ihren Supernova-Explosionen und der Strahlung der Quasare. Zudem haben die kleineren Galaxien vermutlich erst einen geringeren Teil der umgebenden Materie verbraucht, sodass sie ihren gemäßigten Lebensstil bis in die heutige Zeit pflegen konnten. Im Gegensatz dazu haben die großen und verschwenderischen Galaxien ihre Ressourcen erschöpft und können darum keine Materie mehr aus ihrer Umgebung einsammeln. Aus den gegenwärtig laufenden Untersuchungen des Gasanteils von kleinen, nahen Galaxien könnten wir lernen, wie diese Sternsysteme mit ihrem Umfeld interagieren – und so vielleicht endlich die Galaxienentwicklung verstehen.

Doch ein wichtiger Teil des Rätsels bleibt ungelöst: Wie konnten so früh in

der Geschichte des Universums die monströsen Quasare entstehen? Der Sloan Digital Sky Survey – ein Projekt, das sich zum Ziel gesetzt hat, ein Viertel des Himmels zu kartieren und die Distanzen zu über einer Million ferner Galaxien zu messen – hat Quasare entdeckt, die bereits hell strahlten, als das Universum nur ein Sechzehntel seines jetzigen Alters hatte, also etwa 800 Millionen Jahre nach dem Urknall. Fabian Walter vom National Radio Astronomy Observatory und seine Koautoren stießen 2003 auf Spuren von Kohlenmonoxid in der Strahlung eines dieser Quasare. Da Kohlenstoff und Sauerstoff nur durch die thermonuklearen Reaktionen im Innern von Sternen entstehen, folgt daraus, dass es bereits in den ersten wenigen hundert Millionen Jahren nach dem Urknall erhebliche Mengen an Sternen gegeben haben muss. Auch die jüngsten Messungen der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (Wmap) – eines Satelliten, der die kosmische Hintergrundstrahlung untersucht – weisen darauf hin, dass die Sternentstehung schon 200 Millionen Jahre nach dem Urknall begann.

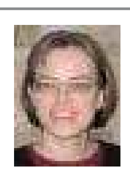
Röntgenblick wie Superman

Des Weiteren zeigen Computersimulationen, dass diese ersten Sterne vermutlich die mehrhundertfache Masse der Sonne hatten. Derartige Giganten würden so hell strahlen, dass sie ihren Brennstoffvorrat innerhalb weniger zehn Millionen Jahre verbraucht hätten. Nach dieser Zeit wären die massereichsten von ihnen zu stellaren Schwarzen Löchern kollabiert, die dann gewissermaßen als Keime für extrem massereiche Schwarze Löcher fungiert haben könnten, die die Kraftwerke der ersten Quasare bildeten.

Diese Erklärung für das frühe Auftauchen der ersten Quasare könnte durch die Erforschung der Gammastrahlungsausbrüche weitere Unterstützung erfahren. Als Ursache für die Gammablitze am Himmel vermuten die Astronomen nämlich den Kollaps sehr massereicher Sterne zu Schwarzen Löchern. Da Gammaausbrüche die stärksten Explosionen im Kosmos sind, können sie selbst in sehr großen Entfernungen entdeckt werden. Im November 2004 startete die Nasa den Swift Gamma-Ray Burst Explorer, einen Satelliten mit drei speziellen Teleskopen für die Beobachtung der Gamma-, Röntgen-, ultravioletten und optischen Strahlung dieser Ausbrüche. Aus den gemessenen Spektren der Explosionen und ihres Nachglühens könnten die Wissenschaftler Informationen darüber gewinnen, wie die kollabierenden Sterne das Wachstum der extrem massereichen Schwarzen Löcher im frühen Universum in Gang gesetzt haben.

Mit Hilfe moderner Röntgen- und Gammastrahlenteleskopen haben die Astronomen nun eine ähnliche Fähigkeit wie der Comicheld Superman erlangt: Sie können selbst in die von dichtem Staub umhüllten Regionen des Kosmos hineinsehen. Dabei sind sie auf eine dramatische Wandlung von mächtigen zu bescheidenen Strahlungsquellen gestoßen. Die riesigen, Sterne bildenden Galaxien und die unersättlichen Schwarzen Löcher aus der Frühzeit des Kosmos haben sich zur Ruhe gesetzt. In einigen Milliarden Jahren werden auch die heute aktiven, kleineren Galaxien einen Großteil ihres Gasvorrats verbraucht haben. Dann wird die Gesamtstrahlung des Kosmos rapide abnehmen. Auch unser Milchstraßensystem wird eines Tages dieses Schicksal ereilen. Die kosmische Wandlung wird voranschreiten: Die Zwerggalaxien, die jeweils nur wenige Millionen Sterne enthalten, aber der häufigste Galaxientyp im Kosmos sind, werden künftig die wichtigsten Regionen der Sternentstehung und der Aktivität Schwarzer Löcher sein. Doch das Universum wird unvermeidlich immer dunkler werden. Zurück bleiben nur die Reste einst mächtiger Galaxien. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Amy J. Barger erforscht die Entwicklung des Kosmos, indem sie dessen älteste Objekte beobachtet. Sie promovierte 1997 an der Universität Cambridge (England) und ist nun Associate Professor an der Universität von Wisconsin-Madison; außerdem ist sie an der Universität von Hawaii in Manao tätig.

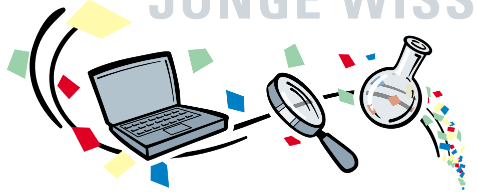
Das junge Universum. Sterne und Weltraum Special 1/2003

Der heiße Kosmos. Sterne und Weltraum Special 4/2003

Schwarze Löcher im Kosmos. Von Mitchell Begelman und Martin Rees. Spektrum Akademischer Verlag, 2000

Supermassive Black Holes in the Distant Universe. Hrsg. von Amy J. Barger. Astrophysics and Space Science Library, Bd. 308. Springer, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Das Heidelberger Life-Science Lab

Aus einer One-Man-Show ist in knapp fünf Jahren eine Institution geworden, die Schülern intensiven Kontakt zur Wissenschaft vermittelt – bis hin zu Forschungsaufenthalten in Kalifornien.

Von Felix Gut

Förderungseinrichtungen für Hochbegabte wie zum Beispiel die Studienstiftung des Deutschen Volkes folgen für die Aufnahme neuer Stipendiaten einem wohl etablierten Verfahren: Der Kandidat wird durch – zum Beispiel – den Schulleiter empfohlen und dann zu einer Präsentation eingeladen, in der er über ein beliebiges Thema vortragen soll; man will sich ja ein Bild von der gesamten Persönlichkeit machen.

So ähnlich ging es mir vor knapp fünf Jahren mit dem Heidelberger Life-Science Lab. In den Räumen des Europäischen Molekularbiologischen Labors (EMBL) durfte ich mich über meine sportliche Lieblingsbeschäftigung, das Rudern, auslassen.

In der Praxis erwies sich diese Fördereinrichtung allerdings als wesentlich weniger bürokratisch als die Studienstiftung. Sie lebte von der Initiative eines einzelnen Menschen. Thomas Schutz, promovierter Biologe am Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ), hatte die Idee ins Leben gerufen und sich Mitstreiter gesucht: Jugendliche sollen die Gelegenheit erhalten, durch Arbeit mit Forschern einen direkten Bezug zur aktuellen Wissenschaft zu bekommen, Theorie und Praxis zu verknüpfen, mögliche Berufsfelder auszuloten und Gleichgesinnte zu finden. Der Eigeninitiative der Teilnehmer wurde von Anfang an sehr breiter Raum gegeben.

Einen Vorgeschmack gab das Eröffnungswochenende in der Jugendherberge Dilsberg. Wir neuen Teilnehmer entdeckten sofort, dass wir alle »auf einer Wellenlänge« liegen. In der durch ein Rollenspiel entfachten Diskussion ging es deutlich härter zu, als ich das sonst aus Jugendgruppen gewohnt war, aber ohne die sonst üblichen Feindseligkeiten.

Ich entschied mich zunächst für die Arbeitsgruppe Molekulare Biologie, die Thomas Schutz mit einem Studenten zusammen leitete. Die nötigen Grundlagen bekamen wir in Crashkursen am Wochenende vermittelt. Viele Referate drehten sich auch um die Anwendungen der Molekularbiologie wie gentechnisch veränderte Pflanzen oder das Klonen, bei denen die ethischen Fragen zu heftigen Diskussionen führten. Bereits nach einem halben Jahr konnten wir unsere theoretischen Kenntnisse in Praktika am DKFZ und bei Roche Diagnostics anwenden.

Biochemie mit Spontantheater und kreativem Stammtisch

Die zweite Arbeitsgruppe, an der ich teilnahm, hatte das Thema Biochemie. Thomas Schutz hatte einen Doktoranden am EMBL als Mentor gewonnen. Diese recht kleine Gruppe hat mir einen Riesenspaß gemacht, weil ich mich – durch Referate, Recherchen, Praktika am EMBL und deren Auswertung – sehr intensiv einbringen konnte. Nach den Arbeitstreffen hatte die gesellige Runde in der Kneipe ihren besonderen Reiz. Um die Treffen aufzulockern und die Teilnehmer von einer Konsumenteneinstellung wegzuführen, spielten wir immer zu Beginn ein Spiel, meist Improvisationstheater. Daraus wurde schließlich ein kleines Theaterstück über eine typische Immunreaktion.

Die Eigeninitiative der Teilnehmer führt häufig relativ rasch zum Ziel. Ein Freund von mir hatte eine Fernsehsendung mit Hervé This gesehen, einem Pariser Chemiker, der sich der »molekularen Gastronomie« verschrieben hat. Nach kurzer Rücksprache mit Thomas Schutz durfte mein Freund ihn einladen; sein öffentlicher Freitagsvortrag hat mich tief beeindruckt.

Hervé This, lange Jahre stellvertretender Chefredakteur von »Pour la Science«, der französischen Schwester dieser Zeitschrift, untersucht die wissenschaftlichen Grundlagen der Kunst, für die sein Land berühmt ist: des Kochens. Nicht nur die Leser seiner Kochbücher, auch die besten Köche Frankreichs zählen zu den Nutznießern seiner Arbeit.

In einer »International Science Academy« (ISA) habe ich 2002 gemeinsam mit Evelyn Sawa in Lissabon an der genetischen Charakterisierung von Mandelbäumen gearbeitet. Die portugiesischen Forscher nahmen uns überaus herzlich auf und bemühten sich sehr, uns alle Hintergründe zu erklären – sofern sie die nicht selbst schon wieder vergessen hatten. Nach der einen Woche Labor besuchten wir drei Tage Lissabon und schrieben eine Woche am Strand der Algarve eine Dokumentation, die uns an wissenschaftliches Schreiben heranführen sollte. Wir waren am Ende mächtig stolz auf unser Ergebnis.

Zu Beginn des Life-Science Lab war die Finanzierung nicht gesichert; die Mentoren mussten alles selbst organisieren und auch Materialien von eigenem Geld kaufen – schon eine Herausforderung an den Idealismus. Inzwischen gibt es eine Stiftung und eine zentrale Geschäftsstelle, Mentoren bekommen eine kleine Vergütung und die letzten Fragen der Versicherung sind geklärt.

Ich selbst wurde nach dem Abitur gemeinsam mit einem weiteren Studen- ▷

Epilepsieforschung an der Taufliege

Da das Genom der Taufliege *Drosophila melanogaster* vollkommen entschlüsselt und kartografiert ist und ihr Nervensystem weniger komplex ist als bei Säugetieren, stellt sie ein ideales Modellsystem für die Grundlagenforschung über das Nervensystem dar. Insbesondere können Taufliegen Anfälle erleiden, die in ihrem Ablauf mit Epilepsieanfällen beim Menschen vergleichbar sind.

Gewisse *Drosophila*-Mutanten reagieren bereits auf Erschütterungen der Umgebung oder schwache elektrische Reize mit einem solchen Anfall. Unter der Bezeichnung *bang sensitive (BS)* werden Stämme wie *easily shocked (eas)*, *technical knockout (tko)* oder *slamdance (sda)* zusammengefasst. Ansonsten ist ihr Verhalten gegenüber dem Wildtyp nicht auffällig.

Indem man die genetischen Veränderungen ausfindig macht, die diesen Verhaltensänderungen zu Grunde liegen, hofft man dem Mechanismus der Anfälle auf die Spur zu kommen. Es wurden bei der Taufliege sowohl Gene gefunden, welche die Empfindlichkeit gegenüber Anfällen erhöhen, als auch solche, die sie unterdrücken.

Im Rahmen dieses Programms untersuchten Gunther Schmitt und ich in unserem dreiwöchigen Praktikum an der Universität von Kalifornien eine neue Mutante auf ihre Neigung zu Anfällen. Mark Tanouye, der Leiter der Abteilung, unterrichtete uns täglich eine Stunde zu den Methoden und Hintergründen seiner Forschung. Für Fragen standen alle anderen Mitarbeiter zur Verfügung; ansonsten waren wir uns selbst überlassen.

Unsere neue Mutante hieß *stress sensitive B (sesB)*. Die Mutation ist homozygot letal, das heißt, wenn das Gen auf beiden Chromosomen vorhanden ist, stirbt die Fliege, bevor sie sich entwickeln kann. Außerdem sterben alle Männchen mit *sesB* in einem frühen Stadium.

Um die Schlagempfindlichkeit zu überprüfen, schüttelt man die Fliegen nach einem standardisierten Verfahren mechanisch durch und beobachtet, ob sie die üblichen fünf Phasen eines epileptischen Anfalls durchlaufen: Initialanfall mit unkontrollierten Muskelzuckungen, einige Minuten Bewegungslosigkeit, erneute Zuckungen, Erholungsphase und Refraktärphase, in der sie sich wieder normal verhalten, allerdings kein weiterer Anfall ausgelöst werden kann. Bei *sesB* zeigte sich, dass sie durch dieses Verfahren nicht zu einem Anfall gebracht werden können, also mehr dem Wildtyp ähneln als den *bang sensitive*.

In einem zweiten Verfahren, dem elektrophysiologischen, wird den Fliegen ein elektrischer Impuls mitten in das Oberschlundganglion versetzt. Gemessen wird die elektrische Reaktion an einem Flugmuskel, dem *Dorsal Longitudinal Muscle* (DLM), der zum Absenken des Flügels verwendet wird. Interessanterweise kann die Taufliege ihre Flugrichtung und -höhe rascher verändern, als die Ausschüttung von Kalzium stattfindet, das zur Aktivierung des Muskels verwendet wird – eine andere Forschungsarbeit in der Arbeitsgruppe von Mark Tanouye.

Die Zuckungen bei einem Anfall sind leicht an dem Muster der Muskelaktivität zu erkennen. Es stellte sich heraus, dass *sesB* auf jeden Fall eine höhere Sensitivität hat als der Wildtyp, allerdings eine wesentlich geringere als die *bang sensitive*. Unsere Untersuchungen am Erbgut der Fliegen passten zu diesem Befund. Ein Defekt in einem bestimmten Gen vermindert die Erschütterungsempfindlichkeit der *sesB*-Fliegen gegenüber den *BS*-Stämmen, wobei es noch auf den genauen Ort des Defekts auf dem Gen ankommt.

Man nimmt daher an, dass *sesB* eine Übergangsgruppe zwischen *bang sensitive* und dem Wildtyp bildet. Weitere Forschungen zum Ablauf der Anfälle sind nun auf der Grundlage dieses Wissens möglich.

Eine ausführliche englischsprachige Dokumentation zum wissenschaftlichen wie zum Ferien-Teil der International Science Academy (ISA) San Francisco 2003 liegt unter http://sanfrancisco.internationalscienceacademy.de zum Download bereit.

An einer Taufliege wird der elektrophysiologische Versuch durchgeführt. Zwei Elektroden (links) geben einen elektrischen Impuls in das Oberschlundganglion. Die Messelektrode sitzt am Thorax, dem Oberkörper der Fliege, und eine Erdungselektrode im Hinterleib, dem Abdomen. Der Draht zwischen Kopf und Thorax ist mit Sekundenkleber befestigt und dient zur Stabilisierung der 1 Millimeter langen Fliege.



FOTO GUNTHER SCHMITT



Das Heidelberger Life-Science Lab

Diese Förderungseinrichtung für naturwissenschaftlich-technisch begabte oder interessierte Schüler will neben dem fachlichen Wissen besonders Kompetenzen wie Teamarbeit, selbst organisiertes Lernen, Präsentationstechniken und Rhetorik weiterentwickeln. Die Arbeit des Life-Science Lab konzentriert sich auf vier Schwerpunkte:

- **öffentliche Vorträge** jeden Freitag von 17 bis 19 Uhr im DKFZ. Die Themen sind nicht an Naturwissenschaften gebunden und orientieren sich an den Interessen der Teilnehmer, die – nach Absprache – auch Referenten einladen dürfen.
- zurzeit zwölf **Arbeitsgruppen** (AGs) zu Themen wie Biochemie, molekulare Biologie, Neurologie, Mathematik, Philosophie und Pharmazie. Die Arbeitsgruppen bestimmen eigenständig ihre Termine, den Ort und die Inhalte. Einige Gruppen bevorzugen einen vierzehntägigen Rhythmus, andere tagen nur an Wochenenden; zwei sind außerhalb Heidelbergs (in Karlsruhe und Heilbronn) angesiedelt. Jede AG wird von einem Mentorenteam betreut, das idealerweise aus einem Wissenschaftler, einem Lehrer und einem Schüler besteht. Die AGs organisieren zusammen mit den Mentoren Praktika am European Molecular Biology Laboratory (EMBL), an Max-Planck-Instituten oder bei Pharma-Unternehmen wie Roche Diagnostics oder Merck.
- **Wochenendseminare** zu Themen, die von den Teilnehmern vorgeschlagen werden, organisiert von Katrin Platzer, Philosophin, Theologin und wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Forschungsstätte der Evangelischen Studiengemeinschaft Heidelberg. Für 2005 sind folgende Themen geplant: »Viren – Diebe, Mörder und Piraten: eine Einführung in die Virologie«, »Rätsel Zeit – einem Geheimnis auf der Spur«, »Vom Stammbaum zur Stammzelle – therapeutische Optionen und ethische Implikationen …« und »Projektmanagement«.
- **International Science Academies (ISAs)** für erfahrene Teilnehmer mit der Möglichkeit, in Kleingruppen an ausländischen Instituten zu arbeiten. Die Organisationsarbeit tragen die Teilnehmer selbst. Es fanden bereits ISAs in Lissabon, San Francisco und verschiedenen Orten in Kenia statt, eine weitere ist für dieses Jahr in San Francisco vorgesehen.

Ergänzt wird das Angebot durch **arbeitsgruppenunabhängige Projekte** (»AGuPs«) von Teilnehmern für Teilnehmer, zum Beispiel die Englisch-, die Musik- und die Jungforscher-AGuP, in der ehemalige Teilnehmer von »Jugend forscht« oder anderen Wettbewerben ihre Erfahrungen weitergeben.

Bewerben kann sich jede Schülerin und jeder Schüler ab der 8. Klasse. Jeder Bewerber hält eine Viertelstunde einen Vortrag über ein beliebiges Thema und wird anschließend eine weitere Viertelstunde zu seinem Vortrag und sich selbst befragt. Auf Vorwissen kommt es nicht so sehr an wie auf Neugier, Engagement und die Bereitschaft zur Zusammenarbeit.

Teilnahmegebühren werden nicht erhoben; die Teilnehmer müssen lediglich ihre Fahrtkosten selbst tragen. Bei manchen in- und ausländischen Akademien sind Teilnehmerbeiträge zu zahlen, die durch Sponsoren möglichst niedrig gehalten werden.

Die Bewerbungsfrist für das Schuljahr 2005/2006 endet am 1. Mai 2005.

Heidelberger Life-Science Lab am DKFZ
Technologiepark III, Gebäude C
Im Neuenheimer Feld 582
69120 Heidelberg
Telefon 06221 4214-00, Fax 06221 4214-10
www.life-science-lab.de

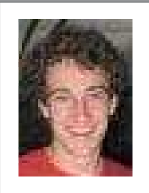
ten und zwei Apothekerinnen vom DKFZ Mentor einer Pharmazie-Arbeitsgruppe – eine besondere Herausforderung, da die Teilnehmer überwiegend die 9. Klasse besuchten und daher kaum chemische oder biologische Vorkenntnisse hatten. Wir erklärten Grundlagen, gaben Hilfestellung bei der Vorbereitung der Referate, organisierten einen Besuch bei einem großen Pharmakonzern ebenso wie Grillfeiern. Kuchen, Pizza und ein Quizspiel namens »Pharmady«, das einschlägigen Fernsehsendungen nachempfunden war und jedes Mal die Themen des letzten Treffens aufgriff, gehörten zum Standardprogramm der Sitzungen.

Meine letzte Aktivität als Teilnehmer war eine ISA an der Universität von Kalifornien in Berkeley, bei der die 16 Teilnehmer vier unvergessliche Wochen erlebten. Wir hatten die gesamte Fahrt selbst organisiert, sodass die Lehrerin aus unserem Mentorenteam, frei von den meisten organisatorischen Aufgaben, selbst ein Praktikum wahrnahm, um zu schauen, »ob sich in den letzten Jahren was im Labor verändert hat«. Tagsüber arbeiteten wir in Zweiergruppen in verschiedenen Laboren. Unser Professor nahm sich jeden Tag eine Stunde Zeit, um uns Grundlagen, Methoden und die Ziele seiner Forschung zu erklären. Abends traf sich unsere Gruppe im YMCA, machte Berkeley unsicher und verabredete, soweit nötig, Gemeinschaftsunternehmungen wie den »Kulturbesuch« eines Baseballspiels, einen Besuch der Universität Stanford oder die Fahrt nach San Francisco.

Anfang dieses Jahres habe ich meine Mitarbeit im Life-Science Lab völlig eingestellt. Die arbeitsintensiven Phasen dort fallen in der Regel mit Klausurenzeiten in der Universität zusammen, sodass ich Prioritäten setzen musste.

Indem ich das Angebot des Life-Science Lab bis zur Neige ausgekostet habe, war ich allerdings auch ein Extrembeispiel für einen Teilnehmer. Man muss sich der Sache nicht mit Haut und Haaren verschreiben.

Was bleibt? Ich habe viel gelernt; aber vor allem habe ich mit lauter interessanten, gleich gesinnten Leuten zusammengearbeitet, was sehr ergiebig war und eine Menge Spaß – auch nach der Arbeit – gemacht hat. Hinzu kam die Erfahrung, in den Mentorenkonferenzen, dem Nachfolger unserer kreativen Stammtische, von den »Erwachsenen« als gleichrangig und als kreativer Ideengeber respektiert zu werden. Ich bin zuversichtlich, dass mir neben den persönlichen Freundschaften auch die wissenschaftlichen Kontakte erhalten bleiben werden. ◁



Felix Gut studiert im dritten Semester Pharmazie in Heidelberg.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Das verkannte Genom-Programm

Der Schlüssel zum Verständnis von Embryonalentwicklung und Evolution könnte in einem bisher wenig erforschten Regulationssystem liegen, das sich auf RNA stützt – statt auf Proteine.

Von John S. Mattick

Unbewiesene Annahmen entwickeln manchmal ein Eigenleben, was besonders in der Naturwissenschaft unangenehme Folgen haben kann. Am Anfang geht es gewöhnlich nur um eine plausible oder einfache Erklärung der Befunde. Wenn sie keine offensichtlichen Mängel aufweist und ihr Wahrheitsgehalt nicht unmittelbar überprüfbar ist, mutiert sie aber oft zum Glaubenssatz. Neue Beobachtungen werden dann passend interpretiert. Irgendwann jedoch muss das Dogma unter der Last eklatanter Widersprüche zusammenbrechen.

Was die Funktionsweise genetischer Systeme und ihren Informationsgehalt betrifft, sind wir mit unserem Verständnis möglicherweise an einem solchen Punkt angelangt. Seit fast einem halben Jahrhundert besteht nunmehr das zentrale Dogma der Molekularbiologie. Es besagt, dass von genetischer Information, die in der DNA-Sequenz gespeichert ist, zunächst spezielle Arbeitskopien aus RNA erstellt werden – und diese dienen dann als Matrizen für die Produktion des jeweiligen Proteins aus Aminosäurebausteinen. Auch in der alten Formel »ein Gen – ein Protein« drückte sich die vorherrschende Ansicht aus, Gene kodierten im Allgemeinen für Eiweißstoffe. Entsprechend mussten Proteine, neben ihrer Funktion etwa als Strukturelemente und Enzyme, auch die Hauptrolle bei der Regulation der Gene selbst spielen.

Die Schlussfolgerung beruht vorwiegend auf Studien an Bakterien wie *Escherichia coli* und anderen einzelligen Lebewesen ohne Zellkern. Für diese Organismen – die Prokaryoten: wörtlich Vorkerner – ist sie sogar nach wie vor im Wesentlichen korrekt. Deren DNA umfasst nämlich fast ausschließlich Proteingene, flankiert von Steuersequenzen. Daneben gibt es zwar Gene für Spezial-RNAs, darunter einige sogar mit regulatorischer Funktion. Doch die machen zumeist nur einen winzigen Bruchteil des Erbguts aus.

Lange Zeit herrschte die Überzeugung vor, Proteine repräsentierten und kontrollierten in ähnlichem Umfang die gesamte genetische Information auch bei vielzelligen Organismen, deren Erbsubstanz geschützt in einem Zellkern liegt. Zu den Echtkernern – den Eukaryoten – gehören Pilze, Pflanzen und Tiere einschließlich des Menschen. Der Franzose Jacques Monod, ein Pionier der Molekularbiologie, umschrieb die Allgemeingültigkeit des Dogmas mit den Worten »Was für *E. coli* gilt, pflegt auch für Elefanten zu stimmen.«

IN KÜRZE

▶ Bei Organismen mit echtem Zellkern scheint ein erstaunlich hoher Anteil der DNA irrelevant für die Proteinproduktion zu sein. Jahrzehntelang galt das Zusatzmaterial daher als **evolutionäres Gerümpel**.

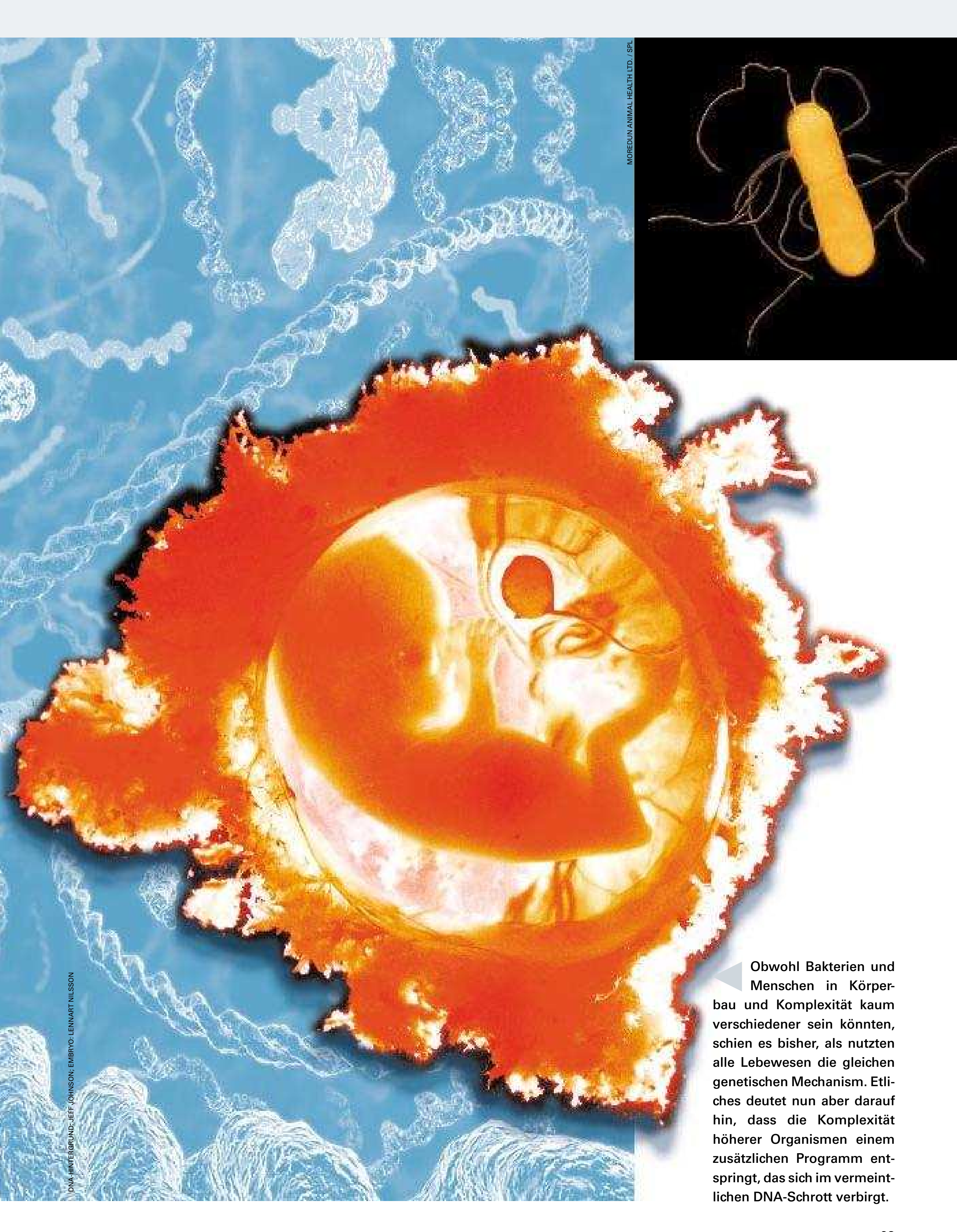
▶ Neuen Hinweisen nach kodiert jedoch der vermeintliche DNA-Schrott für RNA-Moleküle, die vielfältige regulatorische Aufgaben erfüllen könnten. Dahinter verbirgt sich möglicherweise **ein revolutionäres genetisches Steuerungssystem**, grundverschieden von dem der Bakterien, die ja keinen Zellkern besitzen.

▶ Diese neue Theorie könnte erklären, weshalb die strukturelle und **entwicklungsbiologische Komplexität von Organismen** nicht mit der Zahl ihrer Proteingene korreliert. Auch für die medizinische und pharmazeutische Forschung sind diese Entdeckungen von enormer Tragweite.

Gestückelte Gene

Monod hatte nur teilweise Recht. Wie mehr und mehr Forschungsergebnisse der letzten Jahre zeigen, beschreibt das zentrale Dogma die Molekularbiologie der Eukaryoten nur sehr unzureichend. Proteine spielen zwar durchaus auch dort eine Rolle bei der Genregulation, doch parallel dazu existiert ein zweites, bisher übersehenes Regulationssystem. Es basiert auf RNAs, die direkt mit der DNA, anderen RNAs sowie Proteinen interagieren. An eben diesem Netzwerk von RNA-Signalen könnte es liegen, dass beispielsweise der menschliche Organismus eine um Welten höhere strukturelle Komplexität erreicht als jegliches einzellige Lebewesen.

Manche Molekularbiologen stehen solchen grundlegend neuen Ideen zwar noch skeptisch, wenn nicht sogar ablehnend gegenüber. Dennoch könnte diese Theorie dazu beitragen, einige der größten Rätsel der Entwicklungsbiologie und Evolution zu lösen. Zudem ist sie für die Entwicklung von Arzneimitteln und neuen Möglichkeiten der Gentherapie von enormer Tragweite. Mehr noch: Mit der Entdeckung dieses Regulationssys- ▷



Obwohl Bakterien und Menschen in Körperbau und Komplexität kaum verschiedener sein könnten, schien es bisher, als nutzten alle Lebewesen die gleichen genetischen Mechanism. Etliches deutet nun aber darauf hin, dass die Komplexität höherer Organismen einem zusätzlichen Programm entspringt, das sich im vermeintlichen DNA-Schrott verbirgt.

▷ tems ergeben sich Einsichten, die das Design komplexer programmierter Systeme – kybernetischer wie auch biologischer Art – revolutionieren könnten.

Im Grunde zeichnete sich bereits 1977 ab, dass mit der etablierten Theorie über die Funktionsweise des Erbgutprogramms wohl etwas nicht stimmte. Damals entdeckten zwei Arbeitsgruppen – die eine um Philip Sharp am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, die andere um Richard J. Roberts, der heute beim Unternehmen New England Biolabs arbeitet – unabhängig voneinander die Mosaikstruktur »höherer« Gene.

Wie beide feststellten, ist die Bauanweisung für ein Protein bei Eukaryoten nicht als zusammenhängender Text im Erbgut niedergelegt. Vielmehr verteilt sie sich auf mehrere Abschnitte. Diese so genannten Exons sind durch teils sehr lange dazwischengeschobene DNA-Sequenzen getrennt, die keine Proteininformation tragen. Die Einschübe, Introns getauft, werden im Zellkern zunächst mit abgelesen, aber dann aus der langen primären RNA-Abschrift herausgeschnitten. Ein als Spleißen bezeichneter Prozess fügt dabei die RNA-Exons zu einer durchgehenden Bauanweisung, einer Boten-RNA, zusammen. Erst diese Arbeitskopie verlässt den Kern in Richtung Proteinfabriken. Da die herausgetrennten Teile keinen erkennbaren Zweck erfüllten, dachte man, die Zelle würde sie einfach zerlegen und die Bausteine wieder verwenden.

Müllberge und allgegenwärtige Verschwendung?

Doch wenn Introns keine Proteininformation tragen und für Bakterien offenbar entbehrlich sind – weshalb kommen sie dann überall bei Eukaryoten vor? Obwohl ein durchschnittliches menschliches Proteingen zu mindestens 95 Prozent aus Einschüben besteht, hielten die meisten Molekularbiologen sie für funktionslose Überbleibsel einer langen Evolution, Schrott sozusagen. Introns, so die Mutmaßung, stammten aus der Frühzeit des Lebens, als Informationsbruchstücke für Proteine grob zu ersten Genen zusammengestückelt wurden. Vielleicht hatten Introns bei komplexen Organismen überlebt, weil sie sich zufällig als nützlich erwiesen – indem sie zum Beispiel das evolutionäre Umordnen von Teilinformationen zu sinnvollen, neuen Kombinationen erleichterten. Umgekehrt wurde ihr Fehlen bei Bakterien mit dem starken Wettbewerbsdruck im Mikrobenmilieu erklärt, der im Lauf der Evolution Introns als überflüssigen Ballast eliminierte.



Bei Eukaryoten gab es nicht nur mitten in Genen, sondern sogar dazwischen allerhand scheinbar nutzlose DNA. All dies als Schrott abzuqualifizieren war umso einfacher, als die Gesamtgröße eines Genoms nicht sonderlich gut mit der Komplexität seines Trägers korreliert. Die Zellen einiger Amphibien beispielsweise besitzen mindestens fünfmal, einige Amöben sogar tausendmal mehr DNA als die Zellen von Säugetieren. Jahrzehntelang nahmen Forscher daher an, die Zahl der darin enthaltenen Proteingene korreliere weit besser mit der Komplexität dieser Organismen – die unterschiedliche Menge Gerümpel verwische aber diesen Zusammenhang.

Als jedoch die Genome sehr verschiedener Organismen entziffert wurden, entpuppte sich dies als Irrtum: In Wirklichkeit besteht nur eine schwache Beziehung zwischen der Anzahl an Proteingenen und der Komplexität eines Lebewesens. Der recht einfach gebaute Fadenwurm *Caenorhabditis elegans*, mit seinen nur etwa 1000 Zellen Körpermasse, verfügt über rund 19 000 Proteingene – fast 50 Prozent mehr als ein Insekt wie die Taufliege, die mit 13 500 Genen auskommt. Der Mensch bringt es auf ungefähr 25 000.

Ein konsistenteres Bild ergibt sich dagegen zwischen der Komplexität von Organismen und der Menge an nicht für Proteine kodierenden Sequenzen (siehe Diagramm rechts). Beispiel Mensch: Weniger als 1,5 Prozent seiner DNA trägt Baupläne für Eiweißmoleküle, trotzdem wird der größte Teil des Rests in RNA abgeschrieben, also transkribiert. Das stellt einfach ein Rätsel dar. Entweder übertreibt eine menschliche oder eine andere höhere Zelle es mit der Transkription – oder die scheinbar nutzlosen RNAs erfüllen irgendwelche unbekannten Funktionen. Diese Erwägungen und ein Fundus experimenteller Befunde legen inzwischen nahe, dass bei komplexen Lebewesen ein Großteil, bei Säugern vielleicht sogar die Mehrzahl der Gene nicht für Proteine kodiert, sondern RNAs mit direkten regulatorischen Aufgaben bereitstellt (siehe SdW 2/2004, S. 68). Die von diesen RNAs übermittelten Informationen könnten entscheidend für die Entwicklung vom Ei zum reifen Organismus sein und auch in der Evolution eine wesentliche Rolle spielen.

Der Schlüssel zum Verständnis dieses noch kaum erforschten Regulationssystems liegt möglicherweise in einer neuartigen Interpretation der Evolution von Introns. In jüngerer Zeit häufen sich Hinweise, dass diese Sequenzen nicht generell auf die Frühzeit des Lebens zurückgehen, sondern erst bei höheren Organismen in die Gene eindrangen. Vermutlich entwickelten sie sich aus einem Typ mobiler genetischer DNA-Elemente, der – ähnlich den heutigen so genannten Gruppe-II-Introns – die merkwürdige Fähigkeit besaß, sich aus RNA-Abschriften selbst herauszuschneiden. Solche Elemente können sich parasitengleich in das Erbgut ihrer Wirtszellen integrieren.

Auch bei Bakterien kommen Gruppe-II-Introns vor, jedoch nur äußerst selten. Der Grund ist leicht einzusehen. Da in ihren kernlosen Zellen nichts die DNA von den Proteinfabriken trennt, wird die Boten-RNA am fertigen Anfang schon in Protein übersetzt, während ihr Ende noch an der DNA erzeugt wird. Der intronische RNA-Abschnitt könnte sich also nicht rechtzeitig aus der Bauan-

weisung für das Protein ausgliedern, und sie bliebe nutzlos. In den meisten Fällen käme dies einem Lahmlegen des zugehörigen Gens gleich – mit schädlichen Folgen für die Zelle. Bei Eukaryoten hingegen muss die Boten-RNA erst zu den Proteinfabriken außerhalb des Zellkerns wandern. Dies gibt Intron-Abschnitten Gelegenheit, sich rechtzeitig aus ihr herauszuschneiden. Eukaryoten können sie daher in ihrem Erbgut leichter tolerieren.

Solange Introns darauf angewiesen waren, sich selbst aus den RNA-Abschriften auszugliedern, konnten ihre Sequenzen nicht stark von denen der Gruppe II abweichen, ohne diese wichtige Fähigkeit einzubüßen. Zu einem Quantensprung kam es möglicherweise erst mit der Entwicklung des Spleißosoms: Dieser spezialisierte Komplex aus kleinen katalytischen RNAs und etlichen Proteinen hat die Funktion, Introns aus Primärabschriften zu entfernen. Damit waren sie der Last des Selbstspleißens enthoben, was ihnen wesentlich breitere Entwicklungsmöglichkeiten eröffnete. Jede zufällige Mutation im entsprechenden DNA-Abschnitt, die sich für den Wirtsorganismus als nützlich erwies, blieb durch Selektionsdruck erhalten. Intronsequenzen konnten sich künftig eigenständig und parallel zu Proteinen weiterentwickeln.

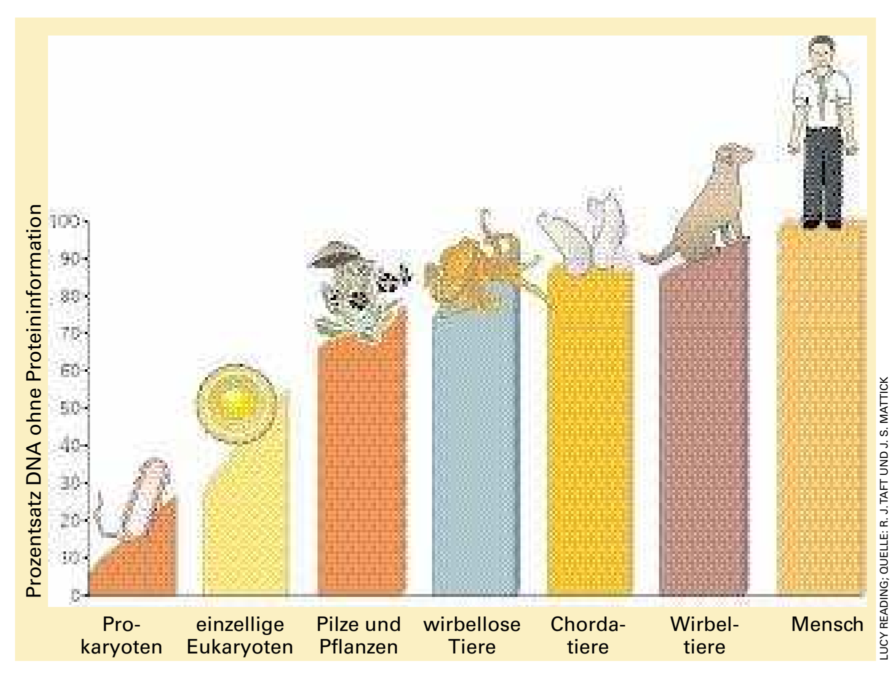
Kurzum: Die Aufnahme von Introns in das Eukaryotengenom läutete möglicherweise eine neue Runde molekularer Evolution ein – auf der Basis von RNA statt Protein. Das angebliche Gerümpel im Erbgut könnte so mehr und mehr echte genetische Funktionen erworben haben, die es in Form seiner RNAs ausübte.

Sollte sich diese Hypothese bewahrheiten, so hieße das: Eukaryoten, besonders die komplexeren Formen, hätten genetische Betriebssysteme und regulative Netzwerke entwickelt, die bei weitem raffinierter sind als die der Prokaryoten, denn RNAs können parallel zu Proteinen regulatorische Informationen übermitteln. Dieses Arrangement erinnert an hoch entwickelte informationsverarbeitende Systeme zur Netzwerkkontrolle in Computern oder im Gehirn.

Weil Proteine in ihrem chemischen und räumlichen Aufbau so vielfältig sind, fallen ihnen naturgemäß funktionelle Aufgaben in den Zellen zu. RNAs hingegen eignen sich besser, wenn es um das Übermitteln von Informationen oder das Regeln von Aktivitäten geht, die das Genom selbst betreffen. Sie können kurze Adresssequenzen tragen, die sie sehr genau an ihren Zielbereich auf anderen RNAs oder auf der genomischen DNA lenken würden. Durch solche Interaktionen mit RNA oder DNA entstehen temporär Gebilde, die für bestimmte Proteine das Signal sein könnten, in Aktion zu treten.

Vergleichbar den digitalen Bitfolgen von Computern ermöglicht die kurze RNA-Basensequenz, welche die Adresse verkörpert, äußerste Präzision. So etwas im Großen und Ganzen als natürliches digitales System zu betrachten ist keineswegs weit hergeholt.

Bei Prokaryoten, also echten Bakterien und anderen Mikroben ohne Zellkern, kodiert nur ein Bruchteil der DNA nicht für Proteine. Bei »Echtkernern« hingegen, den Eukaryoten, wächst dieser überwiegend als funktionslos angesehene Anteil im Allgemeinen mit der Komplexität der Organismen. Er könnte aber die eigentliche Grundlage der Komplexität höherer Lebewesen sein.



LUCY READING; QUELLE: R. J. TAFT UND J. S. MATTICK

Unentbehrlich im Embryo

Die Indizien für die Existenz eines weitgespannten regulatorischen Netzwerks auf RNA-Basis sind überzeugend, wenn auch derzeit noch lückenhaft. In einem solchen System sollten sich viele Gene einzig zu dem Zweck entwickeln haben, für übergeordnete RNA-Regulatoren zu sorgen. Dies scheint tatsächlich der Fall zu sein: Bei Säugetieren konnten inzwischen Tausende von RNAs identifiziert werden, die nicht der Proteinsynthese dienen, so genannte nicht kodierende RNAs. Mindestens die Hälfte, vielleicht sogar mehr als drei Viertel aller Gen-Abschriften fallen in diese Kategorie.

Auch wäre zu vermuten, dass viele solcher RNAs in kleinere Signalmoleküle zerlegt werden, die dann verschiedene Zieladressen des Netzwerks ansteuern. Und tatsächlich: Bei Pilzen, Pflanzen und Tieren haben Forscher bereits Hunderte derartiger »mikroRNAs« entdeckt, die entfernten Introns oder größeren nicht kodierenden RNAs entstammen. Viele der Molekülstückchen steuern das Timing entwicklungsbiologischer Prozesse wie das Beibehalten des Stammzellstatus, die Zellvermehrung und die Apoptose (dieser programmierte Zellselbstmord spielt beim Umbau embryonaler Gewebe eine wesentliche Rolle). Gewiss harren noch viele weitere kleine regulatorische RNAs ihrer Entdeckung.

RNA-Signale, die auf andere RNAs, DNAs oder Proteine abzielen, könnten das genetische Programm einer Zelle in vielfältiger Weise beeinflussen. So ließe sich zum Beispiel einer Reihe von Zielgenen rückmelden, dass gerade eine bestimmte proteinkodierende Sequenz abgeschrieben wurde, was eine parallele Abstimmung der Expression der anderen Gene ermöglichte. Wichtiger ist jedoch wohl, dass das RNA-Signalsystem als eine Art eingebauter genetischer Master- ▷

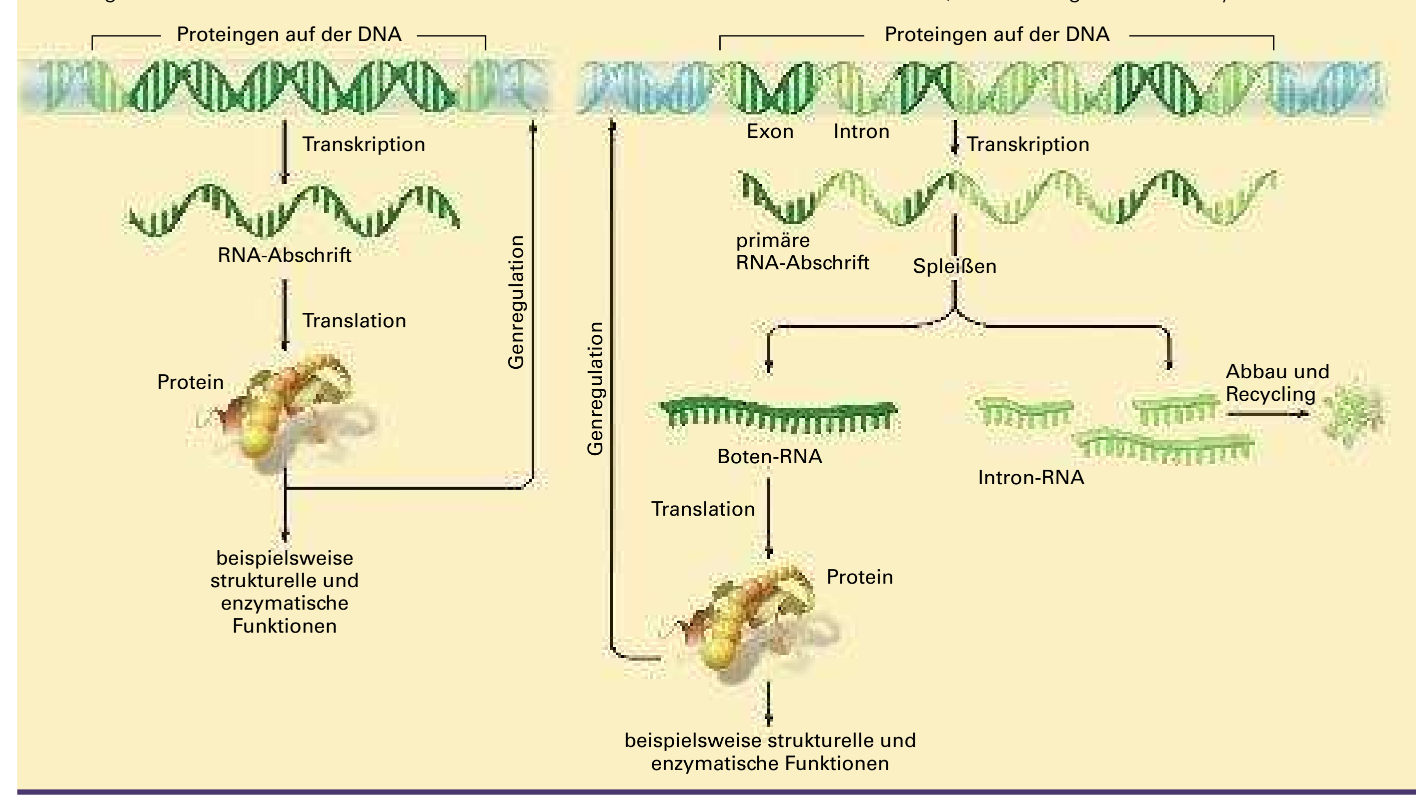
Wie sich die Vorstellungen zur Genaktivität weiterentwickeln

Genexpression bei Bakterien

Die DNA der Prokaryoten – echter Bakterien und Archaeen – umfasst nahezu ausschließlich Sequenzen mit Proteininformation. Von aktiven Proteingenen werden RNA-Arbeitskopien abgeschrieben und noch während ihrer Entstehung in Eiweißmoleküle übersetzt. Ein Teil dieser Proteine reguliert wiederum die Aktivität von Genen.

Konventionelles Modell für Eukaryoten

Bei Organismen mit Zellkern verteilt sich die Proteininformation auf »Exons«, unterbrochen von oft langen »Introns«. Aktive Gene werden zunächst vollständig in RNA abgeschrieben. Beim anschließenden Spleißen schneidet die Zelle die Intronsequenzen heraus und verknüpft die Exons zu einer durchgängig lesbaren Boten-RNA. Dieser Text wird im Zellplasma in Protein übersetzt. Die herausgeschnittene Intron-RNA dient keinem erkennbaren Zweck, sie wird abgebaut und recycelt.



plan fungieren könnte, der Expressionsmuster in die richtige Richtung lenkt. Damit ließen sich einige der größten Rätsel der Zelldifferenzierung und Entwicklungsbiologie lösen.

Während der Embryonalentwicklung entsteht beim Menschen aus einer einzelnen befruchteten Eizelle ein hochkomplizierter Organismus aus schätzungsweise 100 Billionen Zellen mit definierter Lokalisation und Funktion. Das Muster an Genaktivitäten und erzeugten Proteinvarianten, auf dem diese erstaunliche Kreation basiert, hängt stark von zwei Mechanismen ab.

Der erste besteht in einer Modifikation des Chromatins. So heißt der Komplex von DNA und Proteinen, aus dem die Chromosomen bestehen. An beiden Komponenten kann die Zelle lokal chemische Markierungen, etwa Methyl- und Acetylgruppen, anbringen und so bestimmen, welche Bereiche eines Chromosoms für die Ablesemaschinerie zugänglich sind und welche stummgeschaltet bleiben. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass RNA-Signale die Markierung des Chromatins und damit die Genexpression kontrollieren.

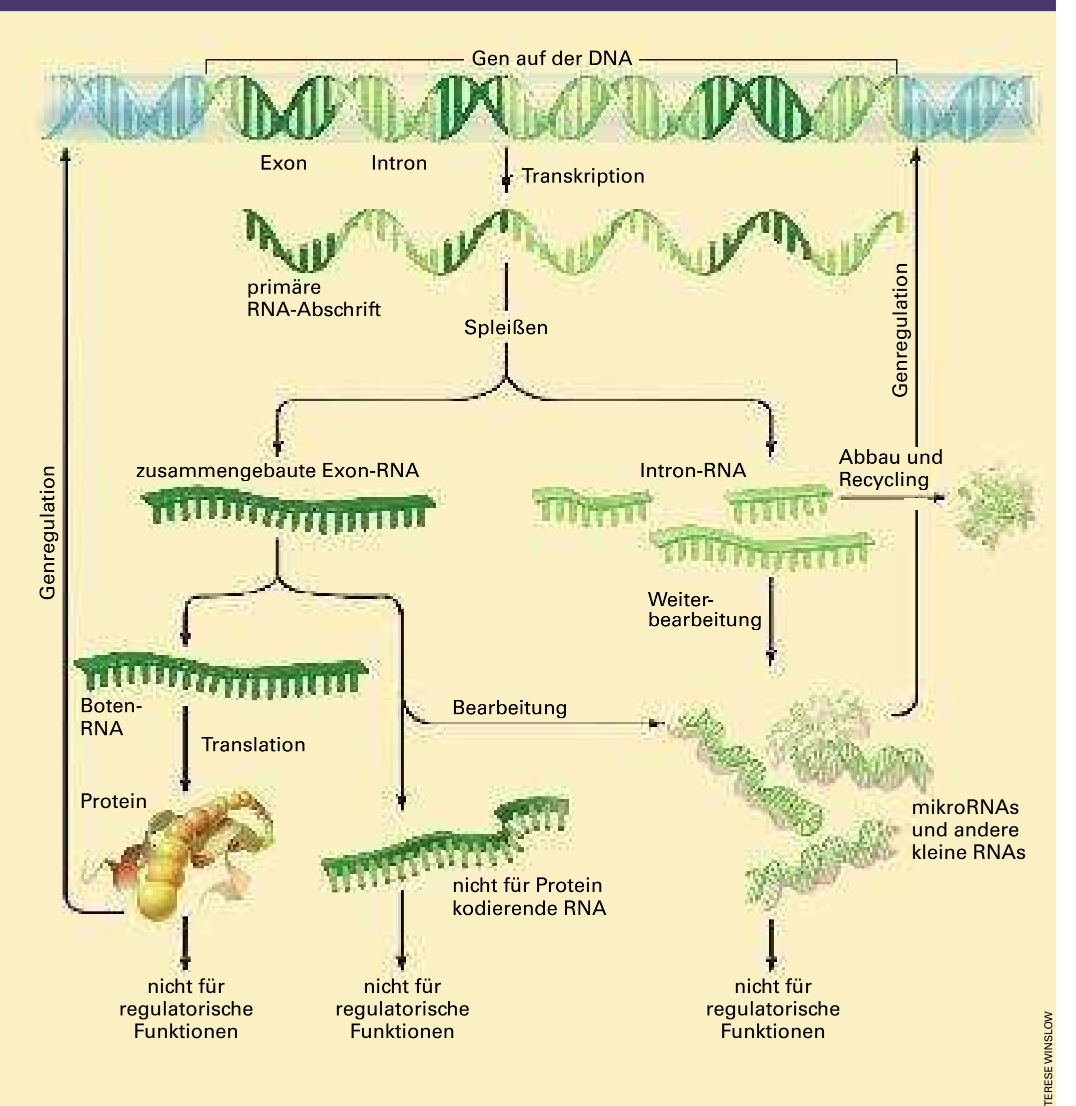
Zellen haben die Wahl

Eine Reihe von komplexen Prozessen, welche die Chromosomen etwa bei der Zellteilung oder der Bildung von Spermien- und Eizellvorläufern betreffen, sowie verschiedenartige genetische Phänomene hängen offenbar von biochemischen Signalwegen ab, die in die so genannte Prozessierung der RNA eingreifen. Das Spleißen – als ein Teil dieser Bearbeitung – erfolgt nicht immer in derselben Weise. Es gibt oft Wahlmöglichkeiten. Dieses alternative Spleißen ist der zweite Mechanismus, der es Zellen verschiedener Gewebe ermöglicht, trotz gleicher genetischer Ausstattung unterschiedliche Repertoirs an RNAs und Proteinen zu erzeugen. Bei Säugetieren werden sogar die meisten der Primärabschriften, die ein Mosaik aus Proteinteilinformation tragen, wahlweise zu einer anderen Bauanweisung zusammengefügt. Ein Gen kann dadurch eben mehr als nur die eine Sorte Protein erzeugen.

Alternatives Spleißen hat zwar fundamentale Bedeutung für die Entwicklung einer Pflanze oder eines Tiers. Dennoch ist nicht geklärt, wie die Zelle entscheidet, welche der möglichen Proteinvarianten zu welchem Zeitpunkt gefertigt werden sollen. Bisher wurden nur wenige spezifische Eiweißstoffe identifiziert, die das alternative Spleißen bestimmter Gene

Neues Modell für Eukaryoten

Einige Intron-RNAs und selbst einige der gespleißten Exon-RNAs könnten direkt bei der Genregulation mitwirken, indem sie mit der DNA, anderen RNAs oder Proteinen interagieren. Indem sie die Proteinproduktion auf verschiedenen Ebenen der Genexpression beeinflussen, geben RNAs, die keine Proteininformation tragen, der Zelle möglicherweise zusätzliche genetische Anweisungen.



steuern. Daher gehen die Wissenschaftler gewöhnlich davon aus, dass ein fein abgestimmter Cocktail von allgemein zuständigen Proteinfaktoren das alternative Spleißen kontextabhängig aktiviert oder unterdrückt. Überzeugende Belege, die diese Annahme stützen, fehlen aber.

Ein attraktiverer Mechanismus, zudem wahrscheinlicher, wäre die direkte Regulation durch RNAs. Diese Moleküle könnten das Spleißen besonders flexibel und genau steuern, indem sie bestimmte Sequenzen des Primärtranskripts markieren oder blockieren, um dem Spleißosom vorzugeben, welche Abschnitte es zu einer Boten-RNA zusammenstellen soll. Dafür spricht beispielsweise, dass die Sequenzen der Intron-Exon-Übergänge, an denen alternatives Spleißen auftritt, oftmals evolutionären Veränderungen widerstanden haben. Sie wurden regelrecht konserviert. Verschiedenen Forschergruppen gelang es, mit künstlichen RNAs, die als passgenaue Gegenstücke bestimmte Übergänge besetzen, das Spleißmuster zu verändern. Dies klappte nicht nur bei Zellkulturen, sondern sogar im Tierexperiment. Es ist durchaus plausibel, dass dieser Mechanismus auch natürlicherweise vorkommt und nur bisher nicht nachgewiesen werden konnte.

Solche Erwägungen führen zwangsläufig zu der allgemeineren Frage, welche Art und Menge von Informationen es braucht, um das Entwicklungsprogramm eines höheren Organismus zu spezifizieren. Zur Konstruktion komplexer Strukturen, seien es Gebäude oder Tiere, bedarf es zweierlei Angaben, nämlich welche Bauteile verwendet werden und wie man sie montiert. Im Fall eines Hauses hat man eine Liste für das Baumaterial und einen Bauplan. Im Fall der biologischen Systeme sind dagegen beide Typen von Information im gleichen Programm verschlüsselt, der DNA-Sequenz.

Die Moleküle, aus denen sich der Organismus aufbaut, sind selbst bei verschiedenen Spezies sehr ähnlich. Etwa 99 Prozent der Proteinsorten im menschlichen Körper finden sich in zumindest vergleichbarer Form auch bei Mäusen und umgekehrt. Viele dieser Eiweißstoffe haben zudem bei anderen Tieren ihre Äquivalente, und solche für grundlegende Zellfunktionen sind sogar bei allen Eukaryoten konserviert. Die offensichtlichen Unterschiede im Körperbau verschiedener Tierarten rühren also sicherlich im Wesentlichen von unterschiedlichen Vorgaben ihres Bauplans her.

Aus welchen Komponenten ein Organismus besteht, bestimmen zweifellos ▷

▷ Proteingene, doch wo steckt die Architekturinformation? Bislang herrscht die Auffassung vor, die Instruktionen für den Bau komplexer Organismen seien irgendwie in den unterschiedlichen Kombinationen regulatorischer Faktoren von Zellen enthalten – das heißt darin, wie und wann welche regulatorischen Proteine untereinander und mit DNA und RNAs interagieren. Zwar ist eine fast endlose Zahl solcher Kombinationsmöglichkeiten denkbar, doch dürfte, wie Daniel C. Dennett von der Tufts-Universität in Medford bemerkte, die Mehrzahl davon entweder chaotische Folgen haben oder bedeutungslos sein.

Dies bringt die Biologie in einen Erklärungsnotstand, denn jeder Organismus muss bei seiner Embryonalentwicklung auch im Lauf der Evolution die sensiblen und wettbewerbswichtigen Wege präzise einhalten – sonst stirbt er. Komplexität zu generieren ist verhältnismäßig einfach, sie unter Kontrolle zu halten jedoch nicht, denn dazu benötigt man eine enorme Menge regulatorischer Information.

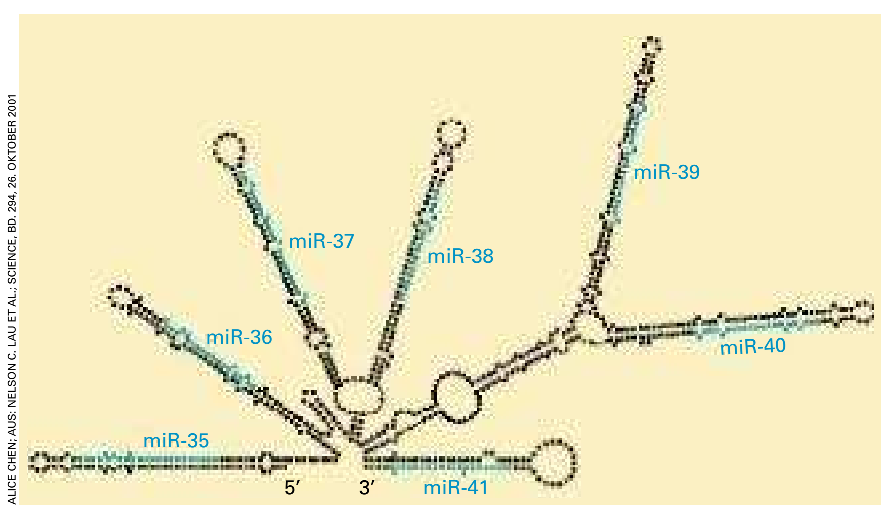
Intuition und mathematischen Überlegungen zufolge dürfte der Steuerungsaufwand nichtlinear, etwa mit dem Quadrat der Genzahl steigen. Mit zunehmender Komplexität eines Systems muss also ein immer größerer Anteil der verfügbaren Kapazität für regulatorische Informationen reserviert werden. Dieses nichtlineare Verhältnis von Regulation und Funktion ist offenbar eine Eigenschaft sämtlicher integrierten Systeme. Sie alle stoßen daher in ihrer Evolution irgendwann an ein immanentes Komplexitätslimit, wenn sie nicht völlig andere Steuerungsmechanismen einführen.

Tatsächlich wächst die Zahl der regulatorischen Proteine bei Bakterien vorhersagegemäß mit dem Quadrat der Genomgröße. Eine Extrapolation der beobachteten Werte zeigt, dass die theoretische Genomgröße, bei der die Zahl der benötigten neuen Regulatoren die der möglichen neuen Gene übersteigt, recht genau an der tatsächlichen Obergrenze von Bakteriengenomen liegt.

Die Komplexität der Prokaryoten war daher während der gesamten Evolution möglicherweise durch den immanenten Regulationsbedarf limitiert – und nicht wie gemeinhin angenommen durch ökologische oder biochemische Faktoren. Zu dieser Folgerung passt, dass in der weitaus längsten Zeit der Geschichte des Lebens zunächst ausschließlich Mikroben auf der Erde existierten. Mittels Proteinkombinatorik allein war es nicht möglich, die Komplexität weiter zu heben.

Eukaryoten müssen eine Lösung für dieses Problem gefunden haben. Der Aufstieg der Vielzeller, der vor etwa einer Milliarde Jahren begann, ist wohl dem Übergang zu einer neuartigen Steuerarchitektur zu verdanken, die weit gehend auf eigenen digitalen RNA-Signalen beruht (siehe Grafik rechts oben). Zumindest könnte diese logische, aus verschiedenen Indizien ableitbare Hypothese die so genannte kambrische Explosion erklären. Damals, im Kambrium vor etwa 520 Millionen Jahren, entwickelte sich in kürzester Zeit aus vergleichsweise sehr einfachen Lebensformen eine atemberaubende Vielfalt wirbelloser Tiere. Diese Erkenntnisse lassen sogar auf eine allgemeinere, über die Biologie hinausgehende Regel schließen: Organisierte Komplexität ist eine Funktion regulatorischer Information. In praktisch allen Systemen, nicht nur biologischen, kommt es zur explosiven Zunahme der Komplexität, wenn bessere Steuerungsmechanismen und integrierte Vernetzungen eingeführt werden.

So könnte das primäre Vorläufermolekül gefaltet sein, aus dem Zellen mehrere mikroRNAs (blau) herausschneiden. Seine Struktur dürfte eine Art Schnittmuster für diese kleinen Signal-RNAs vorgeben.



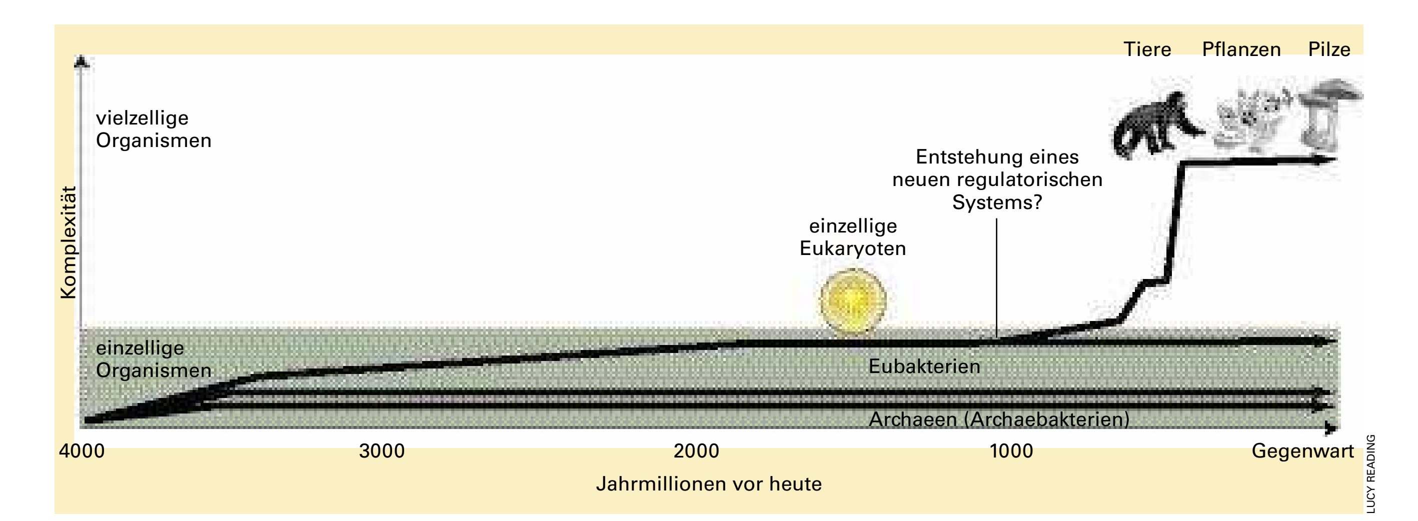
ALICE CHEN; AUS: NELSON C. LAU ET AL.; SCIENCE, BD. 294, 26. OKTOBER 2001

Redigieren der Abschrift

Möglicherweise haben wir bisher völlig missverstanden, wie das Genom programmiert ist und worauf die individuelle und zwischenartliche Variation von Merkmalen beruht. Die genannte Regel impliziert, dass der Großteil des Genoms höherer Organismen gar kein DNA-Müll sein kann, sondern wichtige Funktionen erfüllt. Somit unterliegt er auch evolutionären Zwängen.

Die jüngste überraschende Erkenntnis hierzu besteht darin, dass die Genome von Wirbeltieren tausende nicht für Proteine kodierende Sequenzen enthalten, die seit Jahrmillionen praktisch unverändert beibehalten wurden. Diese DNA-Bereiche sind sogar wesentlich besser konserviert als die Abschnitte für Proteine – ein ganz unerwartetes Ergebnis. Welcher Mechanismus sie quasi eingefroren hat, ist unbekannt, doch ihre extreme Konstanz legt nahe, dass sie auch für unsere Biologie eine entscheidende Rolle spielen. Im Genom höherer Organismen sind demnach die reinen Proteininformationen keine Oasen in einer Wüste nutzloser DNA-Schrotts, sondern eher Inseln in einem Ozean regulatorischer Information, die zum großen Teil in Form von RNA übermittelt wird.

Die Existenz eines weit verzweigten Steuersystems auf RNA-Basis hat vielfältige Konsequenzen auch für die Medikamentenentwicklung und die genetische Diagnostik. Klassische Erbkrankheiten wie die Mukoviszidose oder die Sichelzellanämie beruhen auf einem schwer wiegenden Defekt in einem Protein. Viele, wenn nicht die meisten genetischen Variationen jedoch, die zum Beispiel über die Anfälligkeit für bestimmte Erkrankungen oder die Unverträglichkeit gegenüber einzelnen Medikamenten entscheiden, sind wahrscheinlich eher in den nicht kodierenden regulatorischen



Über mehrere Milliarden Jahre beherrschten einzellige Organismen, vor allem Prokaryoten, die Erde. Mit dem Auftreten vielzelliger Lebewesen kam es zu einem regelrechten Komplexitätsschub, begleitet von einer raschen Diversifizierung. Dies, wie auch der Sprung in die Vielzelligkeit, ließe sich durch die Entwicklung eines neuartigen genetischen Regulationssystems erklären, das sich im vermeintlichen DNA-Schrott verbirgt.

Bereichen unseres Genoms zu suchen, die Wachstum und Entwicklung steuern. (Varianten einiger nicht kodierender RNAs wurden bereits mit Erkrankungen wie B-Zell-Lymphomen, Lungenkrebs, Prostatakrebs, Autismus und Schizophrenie in Zusammenhang gebracht.)

Solche Defekte lassen sich mit den Methoden der molekulargenetischen Epidemiologie nicht so leicht identifizieren. Sie dürften auch nicht zwangsläufig einfacher zu beheben sein. Die Erforschung dieses Regulationssystems könnte jedoch letztlich für das Verständnis unserer physischen und psychischen Individualität oder der Merkmalsausprägung bei Tieren und Pflanzen entscheidend sein. Vielleicht ist dies auch der Auftakt zur Entwicklung höchst raffinierter medizinischer Ansätze sowie innovativer gentechnischer Eingriffe bei Nutztieren und Pflanzen.

Ein weiterer Batzen des vermeintlichen evolutionären Schrotts nimmt etwa 40 Prozent des menschlichen Genoms ein: So genannte Transposons und repetitive genetische Elemente, auch bekannt als springende Gene beziehungsweise Wiederholungssequenzen, gelten wie die Introns gemeinhin als molekulare Parasiten, die unser Genom im Lauf der Evolutionsgeschichte in mehreren Wellen kolonisierten. Zunächst waren sie wohl wenig willkommene Gäste, doch nachdem sie sich in die Gemeinschaft eingefügt hatten, begannen sie und ihre Nachkommen zunehmend aktiver in die weitere Entwicklung einzugreifen, sie zu gestalten und sich mit ihr zu verändern.

Guten, wenn auch bisher lückenhaften Indizien nach tragen Transposons zur Evolution und genomischen Regulation höherer Organismen bei. Sie könnten bei der so genannten epigenetischen Vererbung – der Modifikation genetischer Merkmale – eine zentrale Rolle spielen. Im Juli 2004 berichteten überdies Erev Y. Levanon von der Firma Compugen und seine Kollegen an anderen Institutionen über eine aufregende Entdeckung in Verbindung mit einem Prozess, der fachlich A-zu-I-Editing heißt. Dabei wird der von der DNA abgeschriebene Text an einer bestimmten Stelle nachträglich redigiert: statt A (die Base Adenin) steht dann I (die seltene Base Inosin). Dies kommt beim Menschen – wie die Forscher beobachteten – etwa hundertmal häufiger vor als bisher angenommen. Zudem betrifft es dort mehrheitlich spezielle Wiederholungssequenzen namens Alu-Elemente in nicht kodierenden RNAs. Redigiert wird besonders in Gehirnzellen. Fehler in diesem Prozess stehen offenbar im Zusammenhang mit Erkrankungen wie Epilepsie und Depression.

Zwar ist das A-zu-I-Editing in gewissem Umfang bei allen Tieren nachweisbar, Alu-Sequenzen jedoch stellen eine Besonderheit der Primaten dar. Möglicherweise konnte mit der Aufnahme dieser Elemente in ihr Genom ein neues Komplexitätsniveau der RNA-Prozessierung entstehen, sodass die neuronalen Schaltkreise eine zuvor nicht realisierbare Dynamik und Plastizität zu erreichen vermochten. Vielleicht legte dies den Grundstein für die Entwicklung von höheren kognitiven Prozessen beim Menschen.

Wenn wir verstehen, wie die umfangreiche und höchst raffinierte regulatorische Architektur in den Genomen komplexer Organismen funktioniert, erhellt sich vielleicht auch das Problem, wie selbstreproduzierende und selbstprogrammierende Systeme zu konzipieren sind – also künstliche Intelligenz und künstliches Leben, die ihren Namen wirklich verdienen. In den als Schrott verkannten Genombereichen mag sich das Geheimnis der menschlichen Natur verbergen – und darin eine Anleitung zur Programmierung komplexer Systeme allgemein. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



John S. Mattick ist Professor für Molekularbiologie und Leiter des Instituts für Molekulare Biowissenschaften an der Universität von Queensland. Er war auch Gründungsdirektor des Australischen Genomforschungsinstituts und entwickelte den ersten gentechnischen Impfstoff des Kontinents. 2003 erhielt er die Centenary Medal der Australischen Regierung.

Challenging the dogma: the hidden layer of non-coding RNAs in complex organisms. Von John S. Mattick in: BioEssays, Bd. 25, Nr. 10, S. 930, Oktober 2003

Noncoding RNAs: molecular biology and molecular medicine. Von J. Barciszewski und V. A. Erdmann (Hg.). Landes Bioscience/Eurekah.com. Georgetown, Texas, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Vernichtung der Vergangenheit

Im Bagdader Nationalmuseum herrscht heute relative Ruhe. Aber das Weltkulturerbe des alten Mesopotamien im restlichen Irak ist weiterhin nahezu ungeschützt Plünderungen und Zerstörung ausgeliefert. Der Antikenhandel profitiert davon.

Von Walter Sommerfeld

Als im April 2003 die Bilder der Verwüstung des Nationalmuseums in Bagdad um die Welt gingen, war die Öffentlichkeit schockiert. Die Besatzungsmächte hatten tagelang Plünderungen und Brandschatzungen zugelassen, die die Infrastruktur des Staates verwüsteten. Betroffen waren auch kulturelle Einrichtungen. Nicht nur das Nationalmuseum, sondern ebenso Universitäten, Bibliotheken, Archive, Kunst- und Kulturzentren sowie historische Denkmäler – von den »schlimmsten Zerstörungen seit dem Mongolensturm« und der »systematischen Zerstörung der Kultur des Irak« war die Rede.

Es folgten dann die nicht weniger dramatischen Berichte über die landesweite Ausplünderung der archäologischen Stätten – das Weltkulturerbe der Sumerer, Babylonier und Assyrer war durch flächendeckende Raubgrabungen gefährdet. Danach wurde es in den Medien relativ still – nicht der Untergang des kulturellen Erbes, sondern vor allem die katastrophale Sicherheitslage steht seither im Vordergrund der Berichte.

Wie sieht die Bestandsaufnahme zwei Jahre nach dem Krieg aus? Wie soll es weitergehen unter Besatzung und Widerstand, Chaos, Kriminalität, Mafia, horrender Arbeitslosigkeit, Islamismus und Terrorismus? Eine der wichtigsten Maßnahmen stellte der Umbau des Nationalmuseums in Bagdad zu einem Hochsicherheitstrakt dar. Heute gleicht es einer Festung. Vorbei sind die Zeiten, als man mit dem Auto einfach auf den Hof vor das Hauptgebäude fuhr. Die


WALTER SOMMERFELD

Zugänge sind verschlossen, lediglich in weiter Entfernung vom Museumseingang gibt es einen Einlass, an dem jedes Auto, jede Tasche sorgfältig kontrolliert wird, und erst nach gründlicher Leibesvisitation und Befragung wird Zutritt gewährt. Strenge Sicherheitsvorkehrungen gegen Raub, Überfälle, Anschläge haben im »neuen, befreiten Irak« höchste Priorität bekommen.

Vor zwei Jahren war das Museum in einem schlimmen Zustand. Bei den tagelangen ungestörten Plünderungen waren die Magazine ausgeraubt worden. In wildem Vandalismus hatten die Plünderer außerdem fast die gesamte Einrichtung zertrümmert. Türen und Fenster wurden aus den Angeln, Elektrokabel aus den Wänden gerissen, Karteikarten und Dias verstreut und zertreten, sodass erst eine vollständige Neueinrichtung das Museum wieder funktionstüchtig machen konnte. Glück im Unglück: Die alles vernichtende Brandschatzung blieb aus, Inventarbücher, Grabungsdokumentationen und Buchbestände sind erhalten.

Gefährliche Klimaanlage

Von insgesamt ungefähr einer halben Million Objekten, die das Museum beherbergte, sind definitiv um die 10 000 Stücke gestohlen worden – darunter einige sehr wertvolle Sammlungen. Etwa die doppelte Anzahl wurde bei den Plünderungen beschädigt oder zerstört, doch vieles wird sich restaurieren lassen. Die Verluste waren ursprünglich noch größer, in der Zwischenzeit wurden jedoch einige tausend Objekte konfisziert oder zurückgebracht. Diese Angaben beruhen allerdings wiederum nur auf einer Zwischenbilanz, denn die genaue Bestandsaufnahme ist angesichts der Fülle des Materials noch längst nicht abgeschlossen.

Weniger spektakulär, aber dennoch sehr bedrohlich waren die Schäden, die während des 13 Jahre dauernden Embargos entstanden waren: durch Vernachlässigung, fehlende Laborausstattung oder durch die Einflüsse des extremen subtropischen Klimas. Die meiste Zeit hatte das Museum nicht einmal eine Klimaanlage, obwohl diese seit 1990 bezahlt und exportfertig in einem japanischen Hafen lag – als »Dual-use«-Produkt fiel sie damals unter die Wirtschaftssanktionen. Man hätte damit ja auch eine Chemiefabrik kühlen können. Als Folge solcher Bedingungen sind allein von der Tontafelsammlung, die ungefähr 70 000 Keilschrifttexte umfasst und die von den Plünderern übersehen worden war, inzwischen etwa vierzig Prozent beschädigt oder völlig zerfallen.

Eines der bedeutendsten Museen der Welt war damit zur Ruine verkommen. Die Hilfsmaßnahmen haben inzwischen eingesetzt und bereits gute Erfolge gezeitigt. Die Innenräume sind renoviert und werden nach und nach modern eingerichtet. Die systematische Dokumentation der Archivbestände und auch die Restaurationsarbeiten haben begonnen. Führende internationale Museen beteiligten sich daran, zahlreiche Regierungen und Institutionen haben Finanz- und Sachmittel bereitgestellt, Fachleute kamen vor Ort, um Restauratoren auszubilden. Zusätzlich wurde inzwischen mehr als zwanzig Angestellten eine mehrmonatige Schulung im Ausland ermöglicht, um den Rückstand an Erfahrung und technologischen Kenntnissen aufzuholen. Auch Deutschland steht nicht abseits: Das Deutsche Archäologische Institut in Berlin hat mit Finanzmitteln des Auswärtigen Amts für die Tontafelsammlung 68 Spezialschränke angeschafft. Das Konzept sieht vor, das Iraq Museum in einigen Jahren auf einen modernen internationalen Standard zu bringen.

Dennoch bereitet sich die Museumsdirektion schon wieder auf Schlimmeres vor. Die innere Lage im Irak ist hochexplosiv, jederzeit können auch in Bagdad Aufstände ausbrechen. Wenn das Land im Chaos versinkt, ist wohl eine neue Welle von Plünderungen zu erwarten. Um die Bestände diesmal besser zu sichern als vor dem letzten Krieg, wurden deshalb vor einigen Monaten die Magazine zugemauert.

Nicht allzu weit außerhalb der Hauptstadt ereignet sich mittlerweile unter den Augen der Besatzungsmächte eine Katastrophe, deren Ausmaß jede Vorstellungskraft sprengt. Die Alliierten haben im Südirak keine Kontrolle mehr über einige jener Gebiete, in denen die wichtigsten Stätten der jahrtausendelang blühenden sumerischen und babylonischen Hochkultur liegen. Man hat sie praktisch aufgegeben und als Beutegut der lokalen Bevölkerung überlassen. Diese holt nun unermüdlich aus dem Boden heraus, was sie finden kann – befeuert vom unersättlichen internationalen Antikenhandel und in Unkenntnis des unwiederbringlichen Verlustes, der so angerichtet wird.

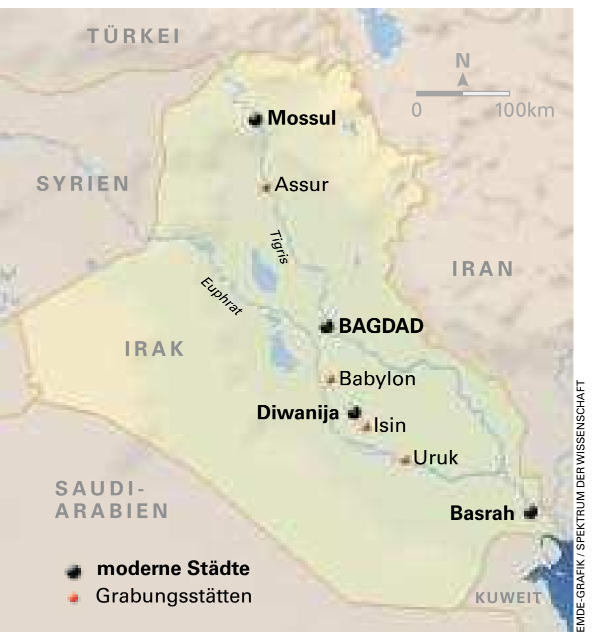
Inzwischen hat die Plünderung des altorientalischen Weltkulturerbes geradezu industriellen Maßstab angenommen. Tag für Tag, Nacht für Nacht ziehen gegenwärtig hunderte, wenn nicht tausende Raubgräber auf die Ruinen, durchwühlen und zerstören sie und hinterlassen eine Mondlandschaft (siehe Bild links). Die lokalen Händler fahren manchmal mit Lastwagen vor und transportieren das Beutegut ab. Im Süden des Landes wird eine große sumerische oder babylonische Stadt nach der anderen in ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Geplündert und verwüstet: das irakische Nationalmuseum in Bagdad im April 2003 (ganz oben). Inzwischen wird das Bauwerk schärfstens bewacht (oben).

Die babylonische Metropole Isin im Jahr 2003: von Raubgräbern in eine Kraterlandschaft verwandelt. Die Schäden der letzten beiden Jahre sind größer als die aus den 150 Jahren zuvor.



EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Isin ist neben Babylon, Assur und Uruk die bedeutendste deutsche Ausgrabungsstätte in Mesopotamien. Die Stadt war Anfang des 2. Jahrtausends v. Chr. Hauptstadt Babyloniens.

kurzer Zeit völlig umgepflügt, dutzende sind schon nahezu vollständig von der Oberfläche verschwunden. Das alte Sumer wird deshalb bald vollständig verloren sein. Altorientalische Antiquitäten, die das Sammlerherz erfreuen, sind durch das große Angebot so preiswert geworden, dass sie für fast jedermann erschwinglich sind. Der wahre Preis – die Vernichtung der ersten Hochkultur der Menschheit – wird dabei billigend in Kauf genommen. Die Schäden, die innerhalb der letzten beiden Jahre auf diese Weise entstanden, sind um ein Vielfaches größer als alle diejenigen, die zuvor in insgesamt 150 Jahren Raubgrabungsgeschichte angerichtet wurden.

Metropole im Stammesgebiet

Mit am schlimmsten betroffen ist Isin, eine uralte sumerische Metropole, die zwei Jahrhunderte lang (von 2000–1800 v. Chr.) das politische und kulturelle Zentrum Babyloniens war. Isin ist neben Babylon, Assur und Uruk die wichtigste deutsche Ausgrabungsstätte in Mesopotamien; von 1973 bis 1989 haben Archäologen unter Barthel Hrouda, dem langjährigen Leiter des Instituts für Vorderasiatische Archäologie der Universität München, systematisch in der quadratkilometergroßen Ruine die Relikte aus der Zeit der frühen Hochkultur ausgegraben.

Vierzig Kilometer von der Provinzhauptstadt Diwanija entfernt, liegt Isin mitten im Stammesgebiet und ist nur von Ortskundigen auf schwierigen Pisten zu erreichen. Als Inschriftenforscher hatte ich dort bei den letzten beiden Ausgrabungen 1988/89 mitgearbeitet und dann das Schicksal der Ruine während des Embargos verfolgt.

Einige Besuche in den 1990er Jahren konnte ich zwar nur unter dem Begleitschutz von bewaffneten Soldaten unternehmen – auch damals waren die südirakischen Stammesgebiete sehr unsicher –, aber Isin lag unberührt in der ländlichen Abgeschiedenheit – wie Jahrtausende zuvor.

Bei meinem letzten Besuch im Januar 2003 erlebte ich jedoch einen gewaltigen Schock. Dutzende riesiger Raublöcher, viele mehrere Meter tief, ein Netzwerk von unterirdischen Stollen und Tunneln hatten den Kernbereich der alten Hauptstadt in eine Kraterlandschaft verwandelt. Der Fortgang der Zerstörungen durch Raubgräber nach dem letzten Krieg ist dann von einigen Journalisten, aber auch von fachkundigen Archäologen verfolgt worden, vorzugsweise aus der Luft, denn die Anreise über Land ist inzwischen kaum noch möglich. Augenzeugen berichteten von zeitweise Hunderten von Raubgräbern, die den fliegenden Zaungästen fröhlich zuwinkten, denn es war ihr Land, in dem sie sich völlig sicher fühlten. Die Zerstörungen, die vor zwei Jahren nur den Kernbereich erfasst hatten, erstrecken sich inzwischen über das gesamte Ruinengelände.

Meine beiden letzten Versuche, im März 2004 nach Isin zu gelangen, scheiterten an dem Umstand, dass ich diese Inspektion aller Wahrscheinlichkeit nach nicht überlebt hätte. Ein irakischer Vorbote, der die Verhältnisse vor Ort erkunden sollte, kehrte um; zuvor war ein anderer Bekannter auf dieser Strecke erschossen worden. Die Situationsanalyse mit dem Chef einer irakischen Sicherheitstruppe, der mich mit zwei gepanzerten Geländewagen und einigen bewaffneten Bodyguards dorthin führen wollte, ergab, dass eine Schlacht mit den Stammeskriegern zu erwarten war.

Ein amerikanischer Journalist – er wurde später im Südirak von Aufständischen entführt, aber nach einigen Tagen Geiselhaft unversehrt wieder freigelassen – wollte mich begleiten. Er beschloss dann nach meinem Rückzieher, alleine die Verhältnisse zu erkunden, und schickte mir anschließend folgenden Kurzbericht:

»Ich fuhr nach Diwanija allein mit meinem Fahrer. Wir trafen dort seinen Cousin, blieben eine Stunde bei ihm und aßen zu Mittag. Wir hatten vor, danach mit dem Direktor des Antikendienstes zu sprechen. Da erhielt der Cousin den Hinweis, dass eine Gruppe von Leuten auf der Suche nach dem Auto mit dem Journalisten war, weil sie uns angreifen wollten. Wir mussten vom Mittagessen aufspringen und fliehen, so schnell wir konnten. Ich will eine andere Gelegenheit herausfinden, nach Isin zu gelangen, ohne dabei getötet zu werden.«

Eldorado für Raubgräber

Nicht überall im Irak herrschen die gleichen katastrophalen Verhältnisse. Im Norden, wo die Zerstörungen insgesamt ohnehin geringer waren, werden die alten Hauptstädte der Assyrer – Ninive, Nimrud und Assur – jetzt durch Wachposten geschützt. Allerdings ist auch hier an die Wiederaufnahme wissenschaftlicher Forschung nicht im Entferntesten zu denken. Vor einigen Monaten wurde der Leiter der irakischen Ausgrabungen von Assur auf dem Weg zu dieser Stätte von Wegelagerern angeschossen. Nur wenig später erlag er im Koma seinen schweren Verletzungen.

Im Zwischenstromland liegen die Wurzeln der Schrift, der Mathematik, der Astronomie, der Grundzüge einer arbeitsteiligen Gesellschaft. All das, was aus unserer modernen Welt gar nicht mehr wegzudenken wäre – hier nahm es seinen Anfang, und nur hier können die Ursprünge unserer Kultur erforscht werden.

Die aus Lehmziegeln errichteten Gebäude dieser antiken Stätten und Städte sind zwar zerfallen, aber ihre Grundrisse sind im Boden erhalten. Straßen und

Vor dem Ansturm der Raubgräber führte das Münchner Institut für Vorderasiatische Archäologe wissenschaftliche Ausgrabungen durch. Hier eine Ansicht des nördlichen Teils des Stadtgebiets

Plätze, die Stadtmauern, Ruinen von Tempeln, von Palästen der Reichen und Behausungen der einfachen Leute, die Handwerksbetriebe, Bibliotheken und Verwaltungsarchive, Kunst und Alltagsgerät – all das, was die Menschen, die dort einst lebten, erschaffen und zurückgelassen hatten, ließe sich von den Archäologen entdecken.

Die Zahl der registrierten antiken Orte beläuft sich auf 10 000, ihr Gesamtumfang wird auf 100 000 geschätzt. Kaum eine andere Nation der Erde verfügt in dieser Dichte über historische Hinterlassenschaften. Der Irak ist geradezu ein einziges archäologisches Gelände – und unter den jetzigen Umständen ein Eldorado für Raubgräber.

Raubgrabungen haben in der Region eine lange Tradition. Das große Interesse, das die Wiederentdeckung des Alten Mesopotamien seit der Mitte des 19. Jahrhunderts im Abendland findet, zog nicht nur die Archäologen ins Land, die Funde aus lizenzierten Kampagnen ins Ausland schafften. Zehntausende Objekte wurden heimlich ausgegraben und füllen heute weltweit die Museen. Das Sammeln altorientalischer Antiquitäten war damals allerdings vor allem eine Liebhaberei exklusiver Kreise. Die Dynamik der modernen profitmaximierenden Vermarktung und der grenzenlosen Sammelleidenschaft fehlte. Die technischen Hilfsmittel, die der Landbevölkerung zur Verfügung standen, konnten außerdem nicht die großflächigen Schäden bewirken, die jetzt zu verzeichnen sind.

Nach der Unabhängigkeit Iraks im Jahr 1932 nahm sich der neu aufgebaute Antikendienst der Pflege des Kulturerbes an. In den Jahrzehnten bis 1990 war es durch vorbildliche Gesetze und effektive Schutzmaßnahmen bestens gesichert. Weder gab es illegale Grabungen noch Museumsdiebstähle oder einen Schwarzmarkt für Antiquitäten.

Die Wurzel des Übels

Das Desaster setzte 1990 als Folge der Besetzung von Kuwait ein. In den Wirren nach dem Golfkrieg wurden einige Provinzmuseen geplündert: Ihre Bestände verschwanden – insgesamt über 4000 Objekte. Bis heute sind nur wenige Stücke wieder aufgetaucht.

Durch das Embargo verarmte die Bevölkerung in unmenschlicher Art und Weise. Die Wurzel des Übels liegt indessen nicht bei den hungernden Bauern, die mit antiken Stücken ein paar Dollar verdienen können, sondern im florierenden Antikenhandel. Ohne diesen Markt gäbe es keine Raubgrabungen. Jeder Euro, der für solche Funde ausgegeben wird, fließt unmittelbar in neue Raubgrabungen, in neue Zerstörung. Die Gier der Sammler, weit entfernt vom Überlebenskampf der irakischen Bevölkerung, die astronomischen Gewinnspannen der Händler, vergleichbar nur mit den Profiten aus dem Rauschgift- und Menschenhandel, das rechtliche Vakuum schaffen erst die Voraussetzungen für dieses Desaster. Der internationale Antikenmarkt, der Milliardenumsätze macht, lässt sich nicht so ohne Weiteres an seinen Geschäften hindern, und seine Lobby ist höchst aktiv.

Einige reiche Privatsammler haben sich in den letzten zehn Jahren solch umfangreiche Sammlungen zusammengekauft, dass diese in ihrer Bedeutung an die Kollektionen der großen Museen heranreichen, die ihre Bestände während der Kolonialzeit füllten. Als »Schurkenstaat« hatte der Irak natürlich keine Lobby, und es gab zur wirksamen Unterbindung dieser Raubzüge keine rechtlichen Maßnahmen.

Der irakische Antikendienst war schlecht ausgestattet. Das Embargoregime verhinderte die Lieferung moderner technischer Geräte, die – wie schnelle geländegängige Fahrzeuge oder Helikopter – eine effektive Unterbindung ermöglicht hätten. Hilfe und Unterstützung aus dem Ausland verstießen nur zu oft gegen die Embargobestim- ▷



ISIN-PROJEKT DES INSTITUTS FÜR VORDERASIATISCHE ARCHÄOLOGIE, LMU MÜNCHEN

mungen. Zwar unternahmen die Behörden verzweifelte Anstrengungen, die wichtigsten historischen Stätten zu schützen, was in vielen Fällen auch gelang. Aber angesichts der großen Zahl antiker Ruinen blieb die Rettung aller Stätten ein aussichtsloses Unternehmen. Vertrieb man die Raubgräber von einer Stelle, setzten sie ihr zerstörerisches Werk nebenan fort.

Der unwiderrufliche Schaden bei der Schatzsuche entsteht durch die Zerstörung der Architektur und des archäologischen Zusammenhangs. Niemand weiß nach dem Werk der Raubgräber, woher die Objekte stammen. Ihr Kontext, für die Interpretation und die Rekonstruktion untergegangener Kulturen entscheidend, ist für immer zerstört. Auf der Suche nach verkäuflichen Objekten, die vielleicht nicht einmal ein Prozent des gesamten archäologischen Bestandes ausmachen, werden bis zu hundert Prozent der Informationen vernichtet.

Wissenschaftliche Ausgrabungen gehen sorgfältig zu Werke und sichern jedes Detail, um daraus in minutiöser Arbeit möglichst viele Einzelheiten der jahrtausendealten Hochkulturen zu rekonstruieren. In einer zweimonatigen Ausgrabung in Mesopotamien werden im Durchschnitt 20 000 Keramikscherben, 500 Fragmente von Kleinfunden und nur 20 bis 50 vollständig erhaltene Gegenstände geborgen. Für den Antikenhandel sind jedoch nur Letztere interessant – ein Bruchteil der wissenschaftlich wertvollen Funde.


WALTER SOMMERFELD

Mit Dutzenden riesigen, mehrere Meter tiefen Gruben und Stollen haben die Raubgräber ein Netzwerk von unterirdischen Tunneln geschaffen – auf der Suche nach verkäuflichen Objekten.

Die Detektivarbeit der Archäologie holt die versunkenen Hochkulturen ins helle Licht. Dies ist allerdings nur möglich, wenn jedes auch noch so unscheinbare Indiz an dem Ort geblieben ist, an dem es vor Jahrtausenden zurückgelassen wurde. Alles ist wichtig: die Lehmziegel der Hausruinen, Reste von Abfallgruben, verrottetes Holz. Die Scherben gehören ebenso zu dieser Detektivarbeit wie Tontafeln, Statuen und Rollsiegel.

Ertragreiche Ausbeute

Nicht selten mussten vor mehr als 4000 Jahren die Bewohner Städte aufgeben, weil die erschöpften, oft versalzten Böden in der Umgebung keine ausreichende Lebensgrundlage mehr boten. Die Tempel wurden sorgsam evakuiert, kein bedeutsamer Kultgegenstand wurde vor Ort gelassen, nur die Architektur blieb erhalten. Archäologen können hier einmalige Erkenntnisse über die Lebensweise der ersten städtischen Zivilisation gewinnen. Solche von Funden fast leer geräumten, aber äußerlich immer noch imposanten Ruinenhügel ziehen jedoch auch die Raubgräber an wie Abenteurer beim Großen Goldrausch. Die mit Lehmziegeln gebauten Städte der Sumerer lassen sich so leicht umgraben wie ein Garten. Für jedes einzelne der attraktiven Objekte, die dann im Handel auftauchen, werden viele Kubikmeter einmaliger Architektur und der gesamte Fundzusammenhang zerstört.

Einstweilen können die Raubgräber auf eine lohnende Ausbeute hoffen – von tausenden antiken Städten sind heute weiterhin Reste erhalten, birgt der Boden immer noch spektakuläre Funde, die die Gier beflügeln. Der fast 4500 Jahre alte Königsfriedhof in Ur aus der Blütezeit der sumerischen Kultur oder die Grüfte der assyrischen Königinnen in Nimrud aus dem 8. Jahrhundert v. Chr. waren bei ihrer Wiederentdeckung unversehrt erhalten. Zahlreiche Grabbeigaben aus Gold und Edelsteinen, von den besten Handwerkern und Künstlern ihrer Zeit gefertigt, zählen zu den bedeutendsten Funden in der Weltgeschichte

Inzwischen sind Besuche in Isin, wenn überhaupt, nur unter bewaffnetem Begleitschutz möglich. Die Gebiete des alten Mesopotamien werden größtenteils von Raubgräber-Banden kontrolliert.



WALTER SOMMERFELD

der Archäologie. Sie geben uns eine unmittelbare Vorstellung von der sagenumwobenen Pracht Babyloniens und der Sieben Weltwunder. In den Händen von Raubgräbern wäre ihre Aussagekraft kaum größer als irgendein hübsches Mitbringsel aus einem orientalischen Bazar.

Auf dem Land herrschen jetzt wie in vergangenen Jahrhunderten Stammesfürsten. Diese Stammesstrukturen, die sich nach dem Mongolensturm 1258 herausgebildet hatten, dominierten bis in die Ära des modernen Nationalstaats im 20. Jahrhundert. Einzige Autorität ist der Scheich, und es werden ausschließlich die eigenen Regeln anerkannt. Wenn unwillkommene Fremde erscheinen, sind sie ihres Lebens nicht sicher.

Die Besatzungstruppen ihrerseits haben mittlerweile in jeder Hinsicht so viele Probleme, dass sie sich nicht auch noch mit den Stämmen, in deren Gebiet viele altorientalische Kulturzentren liegen, anlegen wollen. Vereinzelte Versuche – beispielsweise der Italiener in der Zone um Nassirija –, durch die Anstellung von ausgebildeten und mit moderner Technik ausgerüsteten Wachen einige wichtige archäologische Stätten zu schützen, sind angesichts der vielen Anschläge und Attentate bald zum Erliegen gekommen. Jetzt schützen die Besatzungsmächte wieder lieber sich selbst.

Deutschland ist eingebunden

Nur in Einzelfällen haben die Ausgräber in Jahrzehnten ein so gutes Verhältnis zu den lokalen Stämmen aufgebaut, dass diese den Schutz der Ruine zu ihrer Aufgabe gemacht haben. So blieb erfreulicherweise Uruk, die Hauptstadt der Sumerer und eine Domäne deutscher Archäologie im Irak, sowohl während des Embargos als auch in der Zeit nach dem Zusammenbruch des Staats weit gehend von den Verwüstungen durch Raubgräber verschont.

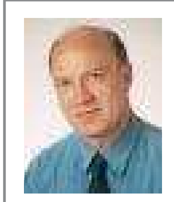
Vom engagierten irakischen Antikendienst in Bagdad, der nur einen Bruchteil der Herkulesaufgabe bei der Rettung des nationalen Erbes bewältigen kann, traut sich mittlerweile kaum noch jemand in die südirakischen Stammesgebiete. Zwar wurde jüngst mit dem Training einer 1200 Mann umfassenden Kulturpolizei begonnen, doch was kann eine solche Minorität in dem großen Land angesichts der Überzahl schwer bewaffneter, kampferprobter und aggressiver Stammeskrieger und Raubgräber ausrichten?

Deutschland ist in die Vernichtung des Weltkulturerbes im Irak eingebunden. Hier ist der Handel mit geraubtem irakischem Kulturgut völlig legal, sofern nicht der Diebstahl eindeutig nachgewiesen werden kann. Dies ist vielleicht bei gut dokumentierten Stücken aus Museumsbeständen möglich, aber niemals bei unbekannten Objekten anonymer Herkunft. Während Großbritannien und die Schweiz, früher Drehscheiben des legalisierten Antikenschmuggels, inzwischen vorbildliche Schutzgesetze erlassen haben, gehört Deutschland zu den Staaten, die die Unesco-Konvention von 1970 (und ihre Ergänzung von 1995) »zum Verbot und zur Verhütung der unzulässigen Einfuhr, Ausfuhr und Übereignung von Kulturgut« nicht ratifiziert haben. Hier gibt es immer noch keine gesetzliche Grundlage, um das Kulturerbe anderer Staaten zu schützen und Antiquitäten, die in den Herkunftsländern illegal akquiriert und ins Ausland geschmuggelt wurden, zu konfiszieren und zurückzugeben. Mit anderen Worten: Die deutsche Rechtslage unterstützt den Fortgang der Vernichtung der frühen Hochkulturen im Irak.

Ein wirksamer Schutz des mesopotamischen Kulturerbes kann allerdings nur durch ein generelles Ende dieses Handels erreicht werden. Erst wenn ein potenzieller Raubgräber weiß, dass er für seine Funde kein Geld bekommt, wird er den Anreiz für sein zerstörerisches Tun verlieren. Erst die Umkehr der Beweispflicht, der obligatorische Nachweis des legalen Erwerbs, und effektive Strafmaßnahmen können die Finanzierung der Raubgrabungen unterbinden oder zumindest erschweren.

Beim Artenschutz hat man dies konsequent getan, sogar die einzig wirksame radikale Regelung trat in Kraft. Ein Zöllner fragt eben nicht, ob das Elfenbeinobjekt im Reisegepäck von einem natürlich verendeten oder von einem gewilderten Tier stammt oder ob es sich um ein altes Erbstück handelt. Er prüft einzig: Ist es Elfenbein – wenn ja, wird es konfisziert. Für eine Rückgabe müssen die engen Ausnahmebestimmungen des legalen Besitzes eindeutig nachgewiesen werden. Diese klare Regelung hat Wirkung gezeigt: Die vom Aussterben bedrohten Elefantenpopulationen konnten sich erholen. Auch die Schildkrötensuppe wurde in Deutschland im Interesse des Artenschutzes verboten. Vergleichbares sollte doch auch zum Schutz des Weltkulturerbes im Irak, das weiterhin mit jedem Tag ein Stück mehr für immer verloren geht, möglich sein. ◁

AUTOR



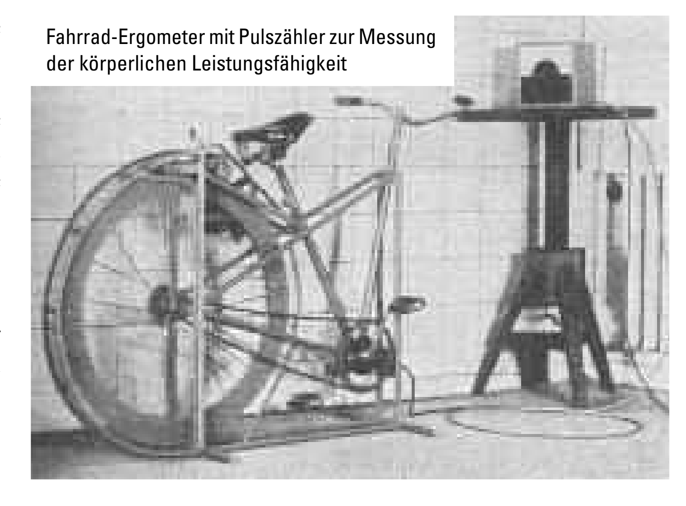
Walter Sommerfeld ist Leiter des Fachgebiets Altorientalistik an der Philipps-Universität Marburg. Seit einem Vierteljahrhundert besucht er regelmäßig das Zweistromland.



Risiko fürs Herz

Nach Untersuchungen von Mitarbeitern … des United States Public Health Service Hospital in Staten Island, New York, … steigen bei tabakempfindlichen Menschen Pulszahl und Blutdruck nach dem Rauchen einer Zigarette an, und man findet eindeutige EKG-Veränderungen … Hinzu kommen präkardiale Sensationen, Irregularitäten des Herzschlags und Dyspnoe bei Anstrengungen … Daß der Nikotingehalt das wesentliche ist, zeigt sich beim Rauchen »denikotinisierter« Zigaretten; es kommt nicht – oder wesentlich geringer – zu den geschilderten Symptomen. *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, 80. Jg., Nr. 12, S. 430, März 1955)*

Fahrrad-Ergometer mit Pulszähler zur Messung der körperlichen Leistungsfähigkeit

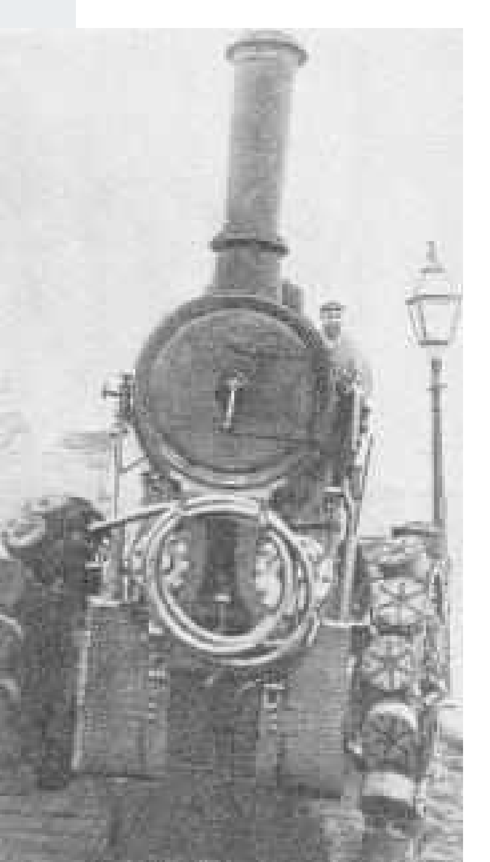


Radioaktive Spürnase

In der Kriminalistik werden radioaktive Isotope neuerdings zur Aufklärung von Einbrüchen und Diebstählen benutzt. Werden Türschwellen … oder Behältnisse mit wertvollem Inhalt … mit einer Farbe angestrichen, die radioaktive Zusätze enthält, kann die Spur des Einbrechers mühelos mit dem Geigerzähler verfolgt werden. Radioaktive Zusätze in von verdächtigen Personen benutzter Tinte können zur Entdeckung von anonymen Briefschreibern führen. Auch die technischen Hilfsmittel der Kernforschung können … an Hand einer in einen Atommeiler eingeführten Haarprobe geringste Spuren von Arsen nachweisen. *(Westermanns Monatshefte, 96. Jg., Heft 3, S. 82, März 1955)*

Radeln für die Wissenschaft

Vor der Messung am Arbeitsplatz … müssen die Beziehungen zwischen körperlicher Arbeit und Pulsfrequenz unter … Laborbedingungen analysiert werden. Dazu dient im Max-Planck-Institut für Arbeitsphysiologie in Dortmund das Fahrrad-Ergometer … Es zeigte sich, daß sich die Pulsfrequenz bei allen Leistungen, die viele Stunden lang … verrichtet werden, rasch auf einen konstanten Wert einstellt … Wird dem Arbeitenden hingegen eine hohe Leistung abverlangt, die zur Erschöpfung führt, steigt die Pulsfrequenz ständig, weil Erholung und Ermüdung nicht miteinander Schritt halten. *(Kosmos, 51. Jg., Heft 3, S. 129f, März 1955)*



◀ Das in London gebaute »Pedrail« trappelte durch die Straßen.

Eine Lok mit Füßen

In den 60er Jahren konstruierte der Engländer Boydell eine Straßenlokomotive, welche ihre Schienen mit sich herumschleppt. Die Räder liefen in einem Rahmen, dessen Seiten sich nacheinander auf die Straße legten und so diese gewissermaßen ebneten … Unser Bild zeigt eine neuere Straßenlokomotive … Die Räder sind mit einer Art Füßen besetzt, welche die Bewegung des Rades zu einer schreitenden machen … Man hat mit der Maschine Stufen hinauf steigen können und Hindernisse mit ihr genommen, die eine gewöhnliche Straßenlokomotive in Verlegenheit gesetzt hätten. *(Das Buch der Neuesten Erfindungen, S. 399, 1905)*



Mit federndem Schritt

Längere Märsche ermüden den Menschen … Der Fersenknochen erfährt bei jedem Schritt einen kräftigen Stoß und gibt ihn weiter nach oben … Auch Rückenmark und Gehirn erleiden eine Erschütterung … Daher sind die Bestrebungen darauf zu richten, daß der Stoß gemildert werde. Man hat durch Einschaltung einer Gummiplatte in den Absatz eines Stiefels dieses Ziel zu erreichen gesucht, oder auch durch Luftkissen … Besser haben sich die Stahlblechfedern bewährt, die von Dr. Breuillard eingeführt worden sind … So halten selbst schwächere Personen einen längeren Marsch aus. *(Das Neue Universum, 26. Jg., S. 195, 1905)*

Die Vision Sonnenenergie

Die Sonnenwärme einzufangen wäre die ideale Lösung, um einer Vergeudung des Kohlenvorrates der Erde entgegenzuwirken … Der schwedische Erfinder Eriksson … hat berechnet, daß man in den Küstengebieten der regenlosen heißen Länder durch Aufstellung entsprechend konstruierter Maschinen etwa zwei Milliarden Pferdekräfte während neun Stunden jedes Tages gewinnen könnte … Experimente sind schon wiederholt gemacht worden … Aber die Maschinen ließen kaum den zwanzigsten Teil der Sonnenstrahlung zur Verwendung kommen. *(Illustriertes Jahrbuch der Erfindungen, 5. Jg., S. 171, 1905)*

Computer der Zukunft

Alle anderthalb Jahre verdoppelt sich die Leistung bei gleich bleibendem Preis. Dieses Regel, die als Moore'sches Gesetz bekannt geworden ist, regiert die Entwicklung der Computer seit mehr als vierzig Jahren. Nach physikalisch wohlbegründeten Prognosen nähert sich das Gesetz den Grenzen seiner Gültigkeit; aber nichtsdestotrotz geht es in der Computertechnik immer noch äußerst lebhaft zu. Wo die Elektronen mit der anwachsenden Schaltgeschwindigkeit der Mikrochips nicht mehr Schritt halten können, übernimmt Licht ihre Aufgabe (S. 94). Wo sie auf langen Datenrennbahnen innerhalb des Mikroprozessors derart heiß laufen, dass der Chip zu schmelzen droht, führen die Designer das Prinzip der kurzen Wege ein: Statt eines »Zentralbüros« sitzen deren zwei oder mehr auf demselben Siliziumplättchen und arbeiten einander möglichst reibungslos in die Hände (S. 90). Und am oberen Ende der Leistungsskala lebt man von den Errungenschaften von gestern – große technische Durchbrüche sind nicht zu vermelden –, aber auf großen Fuß: Moores Gesetz gilt für die Supercomputer der Welt in verschärfter Form, denn schon nach einem statt nach anderthalb Jahren pflegt der dann schnellste Computer der Welt die doppelte Leistung des Vorjahressiegers zu erbringen (siehe den folgenden Artikel).

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Supercomputer – die jüngsten Entwicklungen

Phänomenale Durchbrüche sind nicht zu vermelden; aber die Höchstleistungsrechner entwickeln sich mit einer Geschwindigkeit, die sogar das Tempo der allgemeinen Computerentwicklung in den Schatten stellt.

Gepäckhalle im Flughafen? Gedenkstätte? Nein, Denk- und Rechenstätte! Die schwarzen Gehäuse umhüllen die 1312 Prozessoren vom Typ IBM SP Power 4+, die zusammen den »Jülicher Multiprozessor (JuMP)« bilden. Das Gerät steht im Forschungszentrum Jülich und belegt derzeit Platz 30 auf der Liste der 500 weltschnellsten Computer.

Von Thomas Sterling

Unter Vielfliegern wird die Boeing 737 als »umgebauter VW« belästert. Das ist stark untertrieben. Es ist zwar schon ein bisschen eng in dem kleinsten Passagierflugzeug dieses Herstellers; aber zwischen einem PKW und einem Verkehrsflugzeug liegt, grob geschätzt, ein Faktor von mehr als 1000 – nicht unbedingt in den Ausmaßen, aber in der Leistung und im Anschaffungspreis.

Mit Computern verhält es sich so ähnlich. Ein Standard-PC und die schnellsten Rechner der Welt unterscheiden sich nach Preis und Leistung um mehr als das Tausendfache. Das ist wenig verwunderlich; schließlich verfolgt man mit einem Supercomputer (Flugzeug) Ziele, die mit einem Bürogerät (Auto) nur äußerst mühsam oder gar nicht zu erreichen wären. Wesentliche Fortschritte in Wissenschaft und Technik sind den Hochleistungsrechnern zu verdanken; darüber hinaus werden sie in großem Umfang in der industriellen Produktion, im Geschäftsverkehr und für militärische Zwecke eingesetzt.

Allerdings besteht ein entscheidender Unterschied zwischen Transport- und Rechengeräten: Bei den Computern gibt es umgebaute VWs! Mit dem Faktor 1000, wohlgemerkt. Tausend alte Käfermotoren, zusammengekoppelt, würden immer noch nicht abheben; aber die Prozessoren aus tausend schrottreifen PCs, zusammengeschaltet, rechnen ganz wacker. Ich selbst habe diese Entwicklung vor Jahren vorangetrieben (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 88). Das Konzept, das unter dem Namen »Beowulf« bekannt geworden ist, hat mittlerweile seine Grenzen erreicht. Aber noch rangieren diese Zusammenschaltungen (*clusters*, »Haufen«) aus Prozessoren, die inzwischen nicht mehr aus dem Schrott stammen, aber immer noch Massenware sind, auf den oberen Plätzen der Top500, der Hitliste der 500 weltschnellsten Computer.

Der Computermarkt ist ständig in Bewegung; das gilt in noch höherem Maße für den wesentlich kleineren Markt der Supercomputer. Während nach dem viel zitierten Moore'schen Gesetz die Leistung des durchschnittlichen Computers sich alle anderthalb Jahre zu verdoppeln pflegt, beträgt dieser Zeitraum am oberen Ende der Leistungsskala nur ein Jahr. Für das Wirken dieses Gesetzes, in der einen wie der anderen Version, gibt es nicht eine klar definierbare Ursache, sondern viele kleine: Fortschritte in der Hardwaretechnik, im Gesamtentwurf und in der Programmierung wirken zusammen.

Entsprechend hat dieser Artikel, der die Entwicklungen der letzten anderthalb Jahre zusammenfasst, nicht von einem entscheidenden technischen Durchbruch zu berichten, aber gleichwohl von heftiger Bewegung.

Linpack: der Tachometer für Hochleistungsrechner

Ein Superrechner ist nicht einfach ein großer Großrechner *(mainframe computer)*, sondern in seiner Grundanlage (seiner »Architektur«) eigens auf die Massenverarbeitung zahlenmäßiger Daten ausgerichtet. Das erste Gerät, das diesen Namen verdient, wurde von Seymour Cray in den 1970er Jahren erfunden.

Die Leistung eines Superrechners wird üblicherweise in Flops *(floating point operations per second)* gemessen. Eine *floating point operation* ist ein elementarer Rechenakt, typischerweise eine ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Seymour Cray (1925–1996) gilt als der Erfinder des Supercomputers. Das Bild zeigt ihn um 1974 neben der Cray-1 mit der charakteristischen Tortenform und der Stromversorgung unter den Sitzpolstern.

▷ Multiplikation, mit Gleitkommazahlen; das sind Zahlen in der wissenschaftsüblichen Darstellung mit Mantisse und Exponent, wie zum Beispiel $4{,}27931 \cdot 10^{13}$. Der zurzeit stärkste Rechner der Welt, der »BlueGene« von IBM, der demnächst vom amerikanischen Energieministerium betrieben wird, hat eine theoretische Maximalgeschwindigkeit von 91 Teraflops (Billionen Flops). Das heißt, die 32768 Einzelrechner (Prozessoren), die in ihm enthalten sind, könnten zusammengenommen pro Sekunde 91 Billionen Zahlen multiplizieren.

Wenn sie alle voll beschäftigt wären. Das ist jedoch beim Ablauf eines Programms so gut wie nie der Fall. Es ist praktisch nicht zu vermeiden, dass ein Prozessor auf Daten von anderen wartet. Ein realistischeres Maß für die Leistung eines Superrechners ist daher die Anzahl an Rechenoperationen, die in einem standardisierten Satz von Anwendungsprogrammen erreicht wird. Für die Hitliste Top500 pflegt man als Standardsatz *(benchmark)* eine Sammlung von Programmen der Linearen Algebra, die »Linpack benchmark«, zu verwenden. Das ist durchaus sinnvoll, da wissenschaftliche Rechnungen zum weit überwiegenden Teil aus Operationen der Linearen Algebra bestehen.

In neuerer Zeit ist die Linpack benchmark allerdings in die Kritik geraten: Anscheinend gibt es Rechner, welche die Aufgaben, für die sie gebaut sind, schneller erledigen als andere, die nach dem Linpack-Kriterium besser abschneiden. Möglicherweise sind die Computerhersteller also gar nicht gut beraten, wenn sie ihre Produkte auf möglichst hohe Linpack-Leistung hin optimieren; vielleicht wollen die Kunden etwas ganz anderes.

Wie dem auch sei: Nach Linpack gemessen, bringt »BlueGene« immer noch 70 Teraflops und damit fast doppelt so viel wie der legendäre »Earth Simulator«. Diese japanische Maschine hat immerhin fast drei Jahre lang an der Spitze der Hitliste gestanden (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 14). Als sie 2002 in Betrieb genommen wurde, war sie fünfmal so schnell wie der damals von ihr entthronte Spitzenreiter und überraschte mit ihrer Leistung selbst die Insider.

Der Earth Simulator

Ihre Hauptaufgabe ist die Simulation physikalischer Prozesse, die das Verhalten des Systems Erde bestimmen: Wetter und Klima, Erdbeben und Vulkane, Ozeane und Gezeiten, Eiskappen und Gletscher, Entwaldung und Agrarindustrie, und zwar in einer bis dahin nicht erreichten Kombination aus Gebietsgröße (typischerweise die ganze Erdoberfläche) und Detailgenauigkeit. Die Maschine enthält über 5000 Vektorprozessoren, jeder mit maximal 8 Gigaflops (Milliarden Flops), 10 Terabytes Hauptspeicher und 700 Terabytes Festplattenkapazität. Sie ist in einem eigens konstruierten Gebäude in Yokohama installiert, verbraucht eine Bodenfläche von 2800 Quadratmetern und 3 Megawatt elektrischer Leistung.

Es handelt sich um eine Maßanfertigung. Jedes der Bauteile, insbesondere die Prozessoren, wurde eigens für das Supercomputing entworfen. Der phänomenale Erfolg demonstriert die Überlegenheit dieses Konzepts. Und dennoch: Die Geräte, die den Earth Simulator inzwischen auf den dritten Platz verwiesen haben, sind nicht etwa noch besser maßgeschneidert, sondern aus Massenware zusammengestöpselt.

Die Verständigung zwischen diesen Standard-Rechenchips kann nie so gut sein wie die zwischen solchen, die eigens auf schnelle Kommunikation untereinander ausgelegt sind. Entsprechend mühsamer ist es, sie zu programmieren, um die Folgen dieses Defizits zu mildern, und die Lücke zwischen der (nach Linpack gemessenen) tatsächlichen Leistung und der theoretischen Maximalleistung bleibt trotzdem deutlich größer als bei den maßgeschneiderten Geräten. Standard-Prozessoren sind jedoch so viel billiger, dass man mit den modernen Nachfolgern der Beowulf-Cluster häufig ein besseres Preis-Leistungs-Verhältnis erreicht als mit anderen Supercomputern. Obendrein stehen für Standard-Prozessoren große Mengen von Software nach dem Open-Source-Prinzip kostenlos zur Verfügung. Die Cluster sind die ersten Supercomputer, die davon in erheblichem Umfang Gebrauch machen.

Diese Kostenvorteile haben den Verknüpfungen von Standardbauteilen *(commodity clusters)* eine überaus dominierende Rolle in der Hitliste verschafft. Fast 300 der 500 stärksten Computer der Welt sind Cluster, unter den ersten zehn sind es immerhin die Hälfte.

Einer der interessanteren Cluster, Nummer 7 der Top500, steht am Virginia Polytechnic Institute in Blacksburg (Virginia). In der Liste ist in der Herstellerspalte »self-made« vermerkt, ebenso wie bei neun anderen Supercomputern. Studenten dieser Technischen Hochschule haben 1100 Computer vom Typ Apple G5 zusammengebaut.

Cluster sind international weit verbreitet. Die Volksrepublik China steht mit dem Cluster Dawning 4000A am Supercomputer-Zentrum in Shanghai auf Platz 17. Am europäischen Wettervorhersagezentrum ECMWF *(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)* in Reading (England) stehen gleich zwei mittelgroße Rechenhaufen von IBM (Plätze 11 und 12). Knapp dahinter liegt ein Cluster von Fujitsu am Forschungsinstitut Riken in Wako (Japan). Der stärkste deutsche Rechner steht im Forschungszentrum Jülich, ist eine etwas abgemagerte Version der britischen Wetterrechner und bringt es mit knapp 5,6 Teraflops auf Rang 30.

Eines der elementarsten Merkmale eines Prozessors ist die Anzahl an Bits, die er standardmäßig für die Darstellung

einer Gleitkommazahl oder einer Adresse im Arbeitsspeicher verwendet, die so genannte Wortlänge. Üblich sind bisher 32 Bit, was ausreicht, um eine Zahl mit etwa sechs Dezimalstellen Genauigkeit darzustellen und ungefähr 4 Milliarden Speicherplätze direkt anzusprechen. Beides ist für die Anforderungen des Hochleistungsrechnens zu knapp bemessen. Das zwingt die Programmierer zu aufwändigen und rechenzeitintensiven Hilfsmaßnahmen, zum Beispiel zwei benachbarte Speicherplätze für eine Zahl bereitzustellen und elementare Rechenoperationen entsprechend umzudefinieren. Viele Supercomputer arbeiten daher mit 64-Bit-Adressierung.

Dagegen hat die verbreitetste Mikroprozessor-Architektur, die des IA-32 von Intel, ebenso wie einige andere eine Wortlänge von 32 Bit. Der Marktführer Intel bietet zwar einen 64-Bit-Mikroprozessor an, den Itanium 2, der auch in einigen Hochleistungsrechnern wie dem genannten »Thunder« zum Einsatz kommt. Der Massenmarkt zögerte jedoch mit der Einführung der 64-Bit-Architektur, einerseits weil der Bedarf nach der Mehrleistung dort nicht so drängend ist, andererseits weil Programme für die »kleinen« 32-Bit-Prozessoren nicht ohne Weiteres auf den »großen« 64-Bit-Geräten laufen. Ein neu angeschaffter 64-Bit-Computer wäre also zu nichts oder fast nichts zu gebrauchen gewesen, bis die Softwarehersteller mit dem Umschreiben der Programme nachgekommen wären.

In dieser Situation landete der Chiphersteller AMD einen Überraschungserfolg. Der Mikroprozessor »Opteron« hat im Prinzip eine 32-Bit-Architektur, die auf das 64-Bit-Rechnen erweitert ist. Damit bietet er eine Vereinigung von Vergangenheit – die alten 32-Bit-Programme laufen weiter – und Zukunft – neue Programme schöpfen die Vorzüge der 64-Bit-Darstellung aus –, und das in einem Massenprodukt zu einem vergleichsweise niedrigen Preis. Das machte den Opteron sehr populär; er steckt mittlerweile in 30 von den 500 schnellsten Computern.

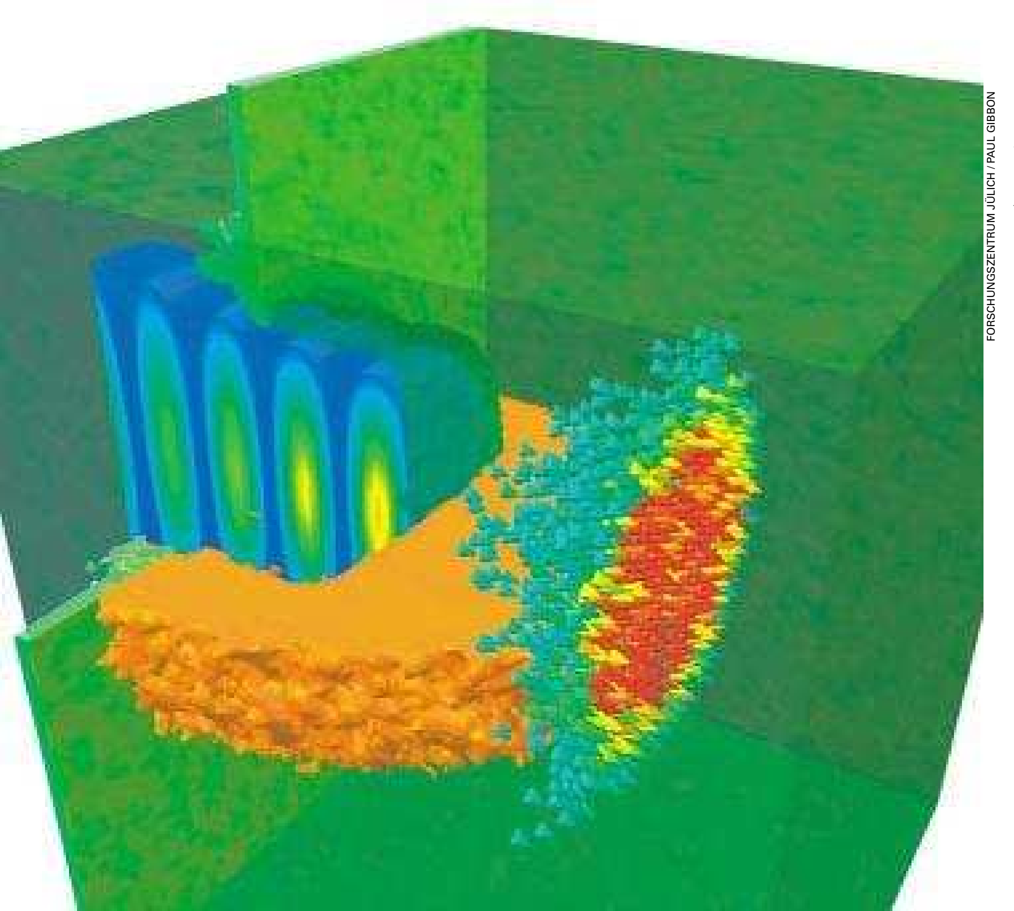
Intel zog mit einem Satz von 64-Bit-Erweiterungen zu seinem IA-32 nach. Damit ist der Anfang gemacht für den Übergang zur 64-Bit-Architektur, die schon bald die Szene dominieren wird.

Cray aus der Asche

In der Mitte der 1970er Jahre war der Name Seymour Cray ein Synonym für Supercomputing; er hat den Superrechner im Wesentlichen erfunden, zuerst bei Control Data Corporation und dann in seiner eigenen Firma Cray Research Inc. (CRI), wo die Cray-1 neue Maßstäbe für das Hochleistungsrechnen setzte. Doch mit dem Ende des Kalten Kriegs sank der Bedarf für diese teuren Systeme, und im rückläufigen Markt waren die hohen Kosten zur Weiterentwicklung der Technologie nicht wieder hereinzuholen. CRI wurde von Silicon Graphics Inc. (SGI) übernommen.

Aber nach einigen Jahren trennte sich SGI wieder von seiner Abteilung für Supercomputer, in der Cray Research aufgegangen war. Der verstoßene Teil fusionierte mit der Firma Tera Computer, die mit einer speziellen Architektur für Parallelrechner namens MTA große Erfolge erzielt hatte. Es handelt sich um eine Form des vielfädigen Rechnens (*multithreaded computing*, vergleiche Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 26). Um die Tradition des großen Namens wieder aufzugreifen und einen entsprechenden Anspruch anzumelden, wurde die neue Firma in »Cray Inc.« umbenannt.

Diesen Anspruch hat sie im vorletzten Jahr mit einem sehr leistungsstarken Vektorrechner, dem Cray-X1, zumindest zum Teil eingelöst (Platz 29 der Liste). Darüber hinaus hat Cray sich auf ein ehrgeiziges Entwicklungsprogramm eingelassen, aus dem eine ganze Serie von Hochleistungsrechnern verschiedener Größenklassen hervorgehen soll. Vor Kurzem erhielt das Unternehmen in Zusammenarbeit mit dem Nationallaboratorium Oak Ridge den Zuschlag bei einer Ausschreibung des Energieministeriums zur Entwicklung eines »Leadership Class Supercomputer«. Gefordert ist eine theoretische Spitzenleistung von 100 Teraflops im Jahr 2006 mit der Option, sie bis auf 250 Teraflops zu erweitern. Wenn das Vorhaben gelingt, stünde dieser Computer zweifellos nach fast jedem Maßstab an der Weltspitze. ▷



FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH / PAUL GIBBON

Eine Arbeitsprobe des Superrechners JuMP: Hochintensives Laserlicht (blaue Wellen, von links) bohrt sich in einen Festkörper, erhitzt ihn auf mehr als eine Milliarde Kelvin und schlägt eine Wolke von Elektronen (orange) heraus, die ihrerseits Ionen (Pfeile) sehr stark beschleunigen. Für diese Simulation hat Paul Gibbon vom Forschungszentrum Jülich den Rechner sämtliche Wechselwirkungen zwischen mehreren Millionen Elektonen und Ionen (Simulationsteilchen) berechnen lassen.

▷ In einer groß angelegten Kooperation mit dem Sandia-Nationallaboratorium in Albuquerque (New Mexico) entwickelt Cray den Superrechner »Red Storm«, in dem Tausende von Opterons über ein maßgeschneidertes Breitband-Verbindungsnetzwerk verknüpft sind. In seiner größten Version soll »Red Storm« 41 Teraflops leisten. Um die Produktlinie nach unten hin zur Mittelklasse zu erweitern, kaufte Cray Inc. die kanadische Firma Octigabay, die ebenfalls Parallelrechner auf Basis des Opteron mit breitbandiger Vernetzung produziert. Dieses neue System, die XD1, wird mit derselben Software laufen wie »Red Storm«. Damit können Softwareentwickler und Anwender nahtlos von einem System zu einem zehntausendfach größeren übergehen. In Deutschland haben das Forschungszentrum Jülich und das Zuse-Institut Berlin Ende des vergangenen Jahres je eine XD1 bestellt.

Wie sage ich's meinem Prozessor?

Damit nicht genug. Cray hat ein noch weit ehrgeizigeres Entwicklungsprogramm aufgelegt, das vom »High Productivity Computing Program« der Darpa, der Forschungsagentur des US-Verteidigungsministeriums, finanziert wird. Aus dem Projekt »Cascade« soll bis zum Ende dieses Jahrzehnts ein marktfähiger Computer im Leistungsbereich Petaflops (1000 Teraflops) hervorgehen.

Damit ist die Firma Cray unter die treibenden Kräfte in der Rechnerentwicklung zurückgekehrt. In ihrem speziellen Marktsegment (dem »capability computing market«) ist ihr Marktanteil von 4 auf 20 Prozent gestiegen und wird nur noch von IBM übertroffen – ein wahrlich phönixhafter Aufstieg aus der Asche ihrer Vorgänger.

Sehr viele Einzelrechner in ein Gestell zu montieren und zu verkabeln kostet zwar viel Platz und sehr viel Geld, ist aber kein ernsthaftes technisches Problem. Nach wie vor schwer ist jedoch die Aufgabe, die Kommunikation unter diesen vielen vor sich hin rechnenden Eigenbrötlern so zu organisieren, dass ein funktionierendes Ganzes daraus wird.

Das dominierende Programmiermodell im Supercomputerbereich heißt *Message Passing Interface* (MPI): Wenn ein Prozessor ein Zwischenergebnis errechnet hat, das ein Kollege zum Weiterrechnen benötigt, so sendet er ihm diese Daten als persönliche Nachricht *(message)*, statt sie in einem allgemein zugänglichen Speicher abzulegen. MPI wurde im Sommer 1998 unter dem Namen MPI-2 standardisiert; seitdem laufen Programme, die sich an diesen Standard halten, auf Superrechnern der verschiedensten Bauarten. Ende vergangenen Jahres veröffentlichte das MPI-Komitee eine Fortschreibung des Standards namens MPICH-2; damit ist für zahlreiche Erweiterungen, die sich in der Zwischenzeit als nützlich erwiesen haben, eine einheitliche Form festgelegt.

Über die Standardisierung hinaus arbeitet das Open-MPI-Konsortium mit Sitz an der Universität von Tennessee in Knoxville an Erweiterungen des MPI mit dem Ziel, das System auch dann am Laufen zu halten, wenn gelegentlich eine *message* verloren geht.

Die Betriebssysteme Linux und Microsoft Windows haben beide ihren Marktanteil bei den Clustern aus Standardware gesteigert. Unter den Abkömmlingen des traditionsreichen Betriebssystems Unix hat sich Linux zum System der Wahl für technische und einige kommerzielle Anwendungen gemausert; Windows wird vorrangig für kommerzielle Zwecke verwendet und konnte im technischen Bereich etwas Fuß fassen. Da Microsoft eigens für das Hochleistungsrechnen eine Arbeitsgruppe gegründet hat, ist zu erwarten, dass Windows in dieser Richtung weiterentwickelt wird und zumindest für bestimmte Anwendergruppen und Clustertypen ein interessantes Niedrigpreisangebot bereitstellt.

Eine besondere Form von Hochleistungsrechnen ist das so genannte *Grid Computing* (Spektrum der Wissenschaft 7/2003, S. 66). Die Rechenarbeit wird auf viele Computer verteilt, die irgendwo auf der Welt stehen können. Ein solches System muss große Entfernungen, politische Grenzen und die Sicherheitssysteme der beteiligten Computer überwinden. Zu den propagierten Nutzeffekten eines Grids zählen Zugriffe aus der Ferne auf gemeinsam genutzte Rechenkapazitäten, die Vereinigung getrennt gelagerter Daten zu einer großen Datenbank und die Schaffung eines virtuellen Supercomputers, indem viele verschiedene Computer unter intensivem Datenaustausch an demselben Problem arbeiten. Dieses letzte Ziel hat sich als illusorisch herausgestellt und war es wohl von Anfang an. Ein Parallelrechner aus räumlich getrennten Komponenten kann zwar funktionieren, wie in zahlreichen hochgelobten Experimenten demonstriert wurde, wird aber aus praktischen Gründen kaum eine ernsthafte Konkurrenz für einen echten Superrechner darstellen.

Die beiden anderen Ziele der Grid-Technologie sind jedoch realistisch. Projekte wie das europäische »Unicore« und das japanische »Naregi« bieten unter an-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ **Eine erste Arbeitsprobe des leistungsstärksten Computers der Welt, IBM BlueGene/L, noch vor der Auslieferung an den Kunden, das amerikanische Energieministerium: Chemische Prozesse in einem Gemisch aus Cholesterin und Omega-3-Fettsäuren werden modelliert, indem die Bewegung jedes einzelnen Atoms berechnet wird.**

Die zwölf schnellsten Computer der Welt: der Anfang der Liste Top500

Rang	Standort	Land, Jahr	Name	Typ, Komponenten, interne Vernetzung	Prozes-soren	Hersteller	Leistung in Gigaflops nach Linpack	theoretisch
1	IBM / US-Energie-ministerium	USA, 2004	BlueGene/L beta-System	BlueGene/L DD2 beta-System (0,7 GHz PowerPC 440)	32768	IBM	70720	91750
2	Nasa, Ames-Forschungs-zentrum / NAS	USA, 2004	Columbia	SGI Altix 1,5 GHz, Voltaire Infiniband	10160	SGI	51870	60960
3	The Earth Simulator Center	Japan, 2002	Earth Simulator	NEC Vector SX6	5120	NEC	35860	40960
4	Centro Nacional de Super-computación, Barcelona	Spanien, 2004	MareNostrum	eServer BladeCenter JS20 (PowerPC970 2,2 GHz), Myrinet	3564	IBM	20530	31363
5	Lawrence Livermore National Laboratory	USA, 2004	Thunder	Intel Itanium2 Tiger4 1,4 GHz – Quadrics	4096	California Digital	19940	22938
6	Los Alamos National Laboratory	USA, 2002	ASCI Q	ASCI Q – AlphaServer SC45, 1,25 GHz	8192	Hewlett-Packard	13880	20480
7	Virginia Polytechnic Institute	USA, 2004	System X	1100 Dual 2,3 GHz Apple XServe/ Mellanox Infiniband 4X / Cisco GigE	2200	Eigenbau	12250	20240
8	IBM Rochester	USA, 2004	BlueGene/L	BlueGene/L DD1 Prototyp (0,5 GHz PowerPC 440 mit Ergänzungen)	8192	IBM / LLNL	11680	16384
9	Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO)	USA, 2004		eServer pSeries 655 (1,7 GHz Power4+)	2944	IBM	10310	20019
10	National Center for Super-computing Applications (NCSA)	USA, 2003	Tungsten	PowerEdge 1750, P4 Xeon 3,06 GHz, Myrinet	2500	Dell	9819	15300
11	ECMWF, Reading	GB, 2004		eServer pSeries 690 (1,9 GHz Power4+)	2176	IBM	9241	16538
12	ECMWF, Reading	GB, 2004		eServer pSeries 690 (1,9 GHz Power4+)	2176	IBM	9241	16538

derem den Fernzugriff auf Rechenkapazität. Die räumlich verteilte Datenbank wird durch so erfolgreiche Projekte wie das »e-Science Grid« in Großbritannien und das »National Virtual Observatory« in den USA realisiert.

Auf dem Weg zum Billiardenrechner

Ein Teraflops zu erreichen war das erklärte Ziel der amerikanischen Hochleistungsrechner-Initiative in den 1990er Jahren. Heute betreibt die Darpa ein Nachfolgeprogramm namens HPCS *(high performance computing systems)*, dessen zweite Phase von 2004 bis 2006 läuft und dessen dritte Phase, wenn sie finanziert wird, bis 2009 geplant ist. In diesem Programm strebt man nach drei Nullen mehr vor dem Komma: Petaflops, das heißt 10^{15} Rechenoperationen pro Sekunde, sind angesagt. Und einige Ereignisse der jüngsten Zeit zeigen, dass es bis zum Erreichen dieses Ziels wahrscheinlich nur noch wenige Jahre sind.

Eine japanische Gruppe arbeitet weiter an dem Projekt »Grape«, das speziell auf die Berechnung von Vielteilchensystemen ausgerichtet ist. Die »Teilchen« können dabei ebenso Sterne in einer Galaxie wie Atome in miteinander reagierenden Molekülen sein. IBM entwickelt ein System namens »Cyclops«, bei dem der Prozessor im Wortsinn im Arbeitsspeicher steckt *(processor in memory system)* und das auf eine Reihe interessanter Probleme, darunter Proteinfaltung, anwendbar sein soll. Solche sehr stark spezialisierten Systeme könnten unter den ersten sein, die irgendwann im Jahr 2007 oder 2008 mehrere Petaflops Dauerleistung liefern werden – aber eben nur in ihrem engen Spezialgebiet.

Der erste universelle Petaflops-Computer könnte der BG/P sein, ein Abkömmling des IBM BlueGene/Light (BG/L), der zurzeit im Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium installiert wird. Seine Prototypen liegen in der Top500 bereits weit vorne. Mit 65 536 Prozessoren wird seine Spitzenleistung bei 360 Teraflops liegen. Auf dieser Grundlage könnte der BG/P mit verbesserten Prozessor- und Netzwerkfähigkeiten eine Spitzenleistung von einem Petaflops im Jahr 2007 oder 2008 erreichen.

In der oben erwähnten Ausschreibung der Darpa erhielten neben Cray auch IBM und Sun Microsystems Forschungsaufträge mit dem Ziel, bis 2010 einen marktfähigen, universellen Petaflops-Computer zu entwickeln. Zwei der drei beteiligten Firmen sollen im Anschluss daran auch Aufträge zum Bau eines solchen Geräts erhalten, der in den vier darauf folgenden Jahren stattfinden soll.

Auch wenn kein spektakulärer Durchbruch stattgefunden hat: Die Entwicklung verläuft nach wie vor rasend schnell. Eine Verdopplung der Rechengeschwindigkeit pro Jahr macht einen Faktor 1000 – was dem Unterschied zwischen einem VW und einer Boeing 737 entspricht – in zehn Jahren; und es sieht ganz so aus, als würde die technische Entwicklung auch im laufenden Jahrzehnt diese Vorgabe einhalten. ◁



AUTOR

Thomas Sterling arbeitet am Center for Advanced Computing Research des California Institute of Technology in Pasadena und ist zugleich Chef-Wissenschaftler am Jet Propulsion Laboratory. Dieser Artikel ist die aktualisierte Version eines Vortrags, den er im vergangenen Sommer auf der Internationalen Supercomputer-Tagung (ISC2004) in Heidelberg gehalten hat.

Doppelt zählt besser

Pentium und seine Prozessorkollegen stoßen an ihre Grenzen. Die Chipindustrie reagiert mit »Multi-Core-Chips«. Für Softwareentwickler ist dies keine gute Nachricht.

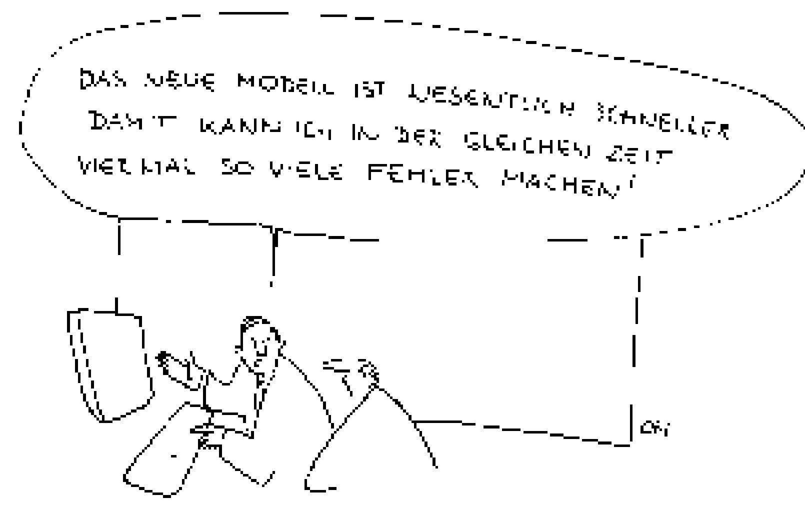
Von W. Wayt Gibbs

Es war nie die Frage ob, sondern wann und warum: Wann würden die Hersteller von Mikroprozessoren gezwungen sein, einen kleineren Gang einzulegen, warum würde die scheinbar so eiserne Regel »alle zwei Jahren ein schnellerer Chip« nicht mehr durchzuhalten sein? Woran würde sie scheitern: an fundamentalen Gesetzen der Physik oder an schnöden Kosten? Offenbar hat die Trendwende bereits begonnen, und zwar aus beiden Gründen.

Fast alle Halbleiterhersteller hatten im vergangenen Jahr mit Fertigungsproblemen zu kämpfen. Besonders offenkundig wurde dies bei Marktführer Intel. Die Chipschmiede musste die Auslieferung ihres »Prescott« – eines neues Modells der Pentium-4-Serie – um mehr als ein halbes Jahr aufschieben, um Fehler auszumerzen. Als der Chip endlich auf den Markt kam, waren Tester von seiner Leistung nicht sonderlich begeistert: Trotz seiner 125 Millionen Transistoren übertraf er den mit 55 Millionen solcher Elemente bestückten Vorgänger nur knapp. Intel rief überdies Lieferungen eines weiteren fehlerhaften Mikrochips zurück, stellte die Einführung eines neuen Notebook-Prozessors zurück und verschob eine 4-Gigahertz-Variante des Pentium 4, die eigentlich im vergangenen Herbst kommen sollte, auf dieses Jahr.

Die Entscheidung mit der größten Tragweite aber fällte der Marktführer im Mai 2004: Alle Entwicklungsarbeiten an einer nächsten Generationen von Pentium-4- und Xeon-Prozessoren wurden eingestellt. »Etwa zwei Jahre Arbeit hatten wir schon hineingesteckt«, schätzt William M. Siu, der als Manager von Intels Desktopcomputer-Abteilung den Stopp beantragt hatte. Mit diesem Beschluss musste der Konzern nicht nur erhebliche Investitionen als Verlust verbuchen, sondern etwas weit Schmerzlicheres eingestehen: Das Bauprinzip – die »Architektur« – des Pentium, der das Kerngeschäft Intels ausmacht und in drei Vierteln aller Computer der Welt steckt, ist früher als geplant an das Ende seiner Möglichkeiten gestoßen.

Die neue Marschrichtung des Konzerns lautet: Auf jedem neu zu entwerfenden Chip sind mindestens zwei Prozessorkerne integriert. Bislang gab es in Desktopcomputern und Servern nur eine einzige dieser im Englischen *core* genannten zentralen Komponente zur Befehlsverarbeitung. Einige Hochleistungscomputer rechnen zwar heute schon mit zwei Prozessoren auf ein und demselben Mainboard, doch stecken diese in separaten Sockeln (die hohe Rechenleistung kommt durch Zusammenschalten mehrerer Mainboards zu Stande; siehe den Beitrag auf S. 85). Dagegen stellt die Integration mehrerer Prozessorkerne auf einem Chip eine weit reichende Designveränderung dar. Denn damit verringert sich auf Grund der kürzeren Leitungswege die Zeit für Interaktionen auf Bruchteile von Nanosekunden.

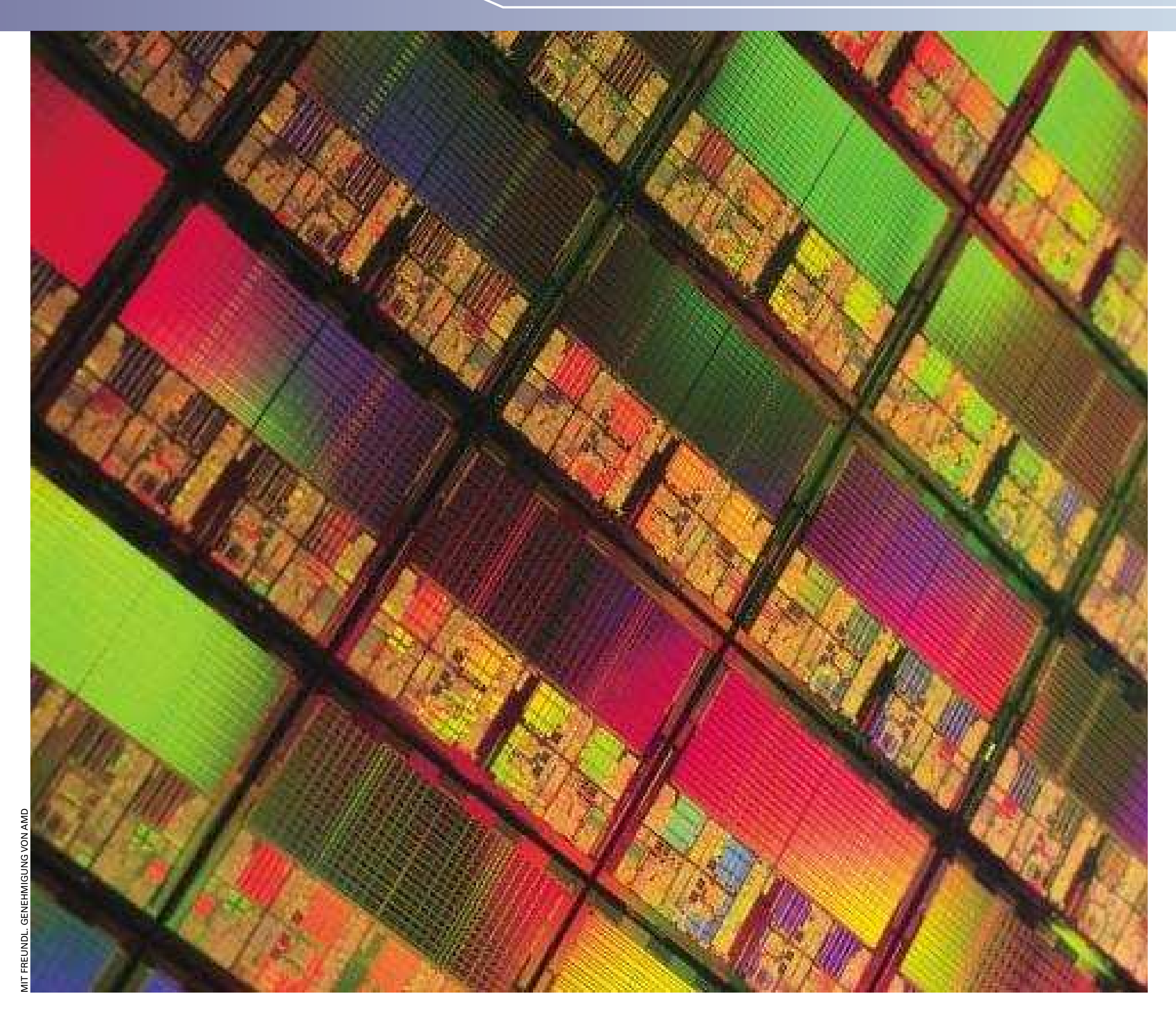


Diener zweier Herren

Schon 2001 hatte IBM mit dem »Power4« einen Dual-Core-Prozessor eingeführt, Intel will aber das erste Unternehmen sein, das diese Technologie auf den Massenmarkt bringt. Dazu muss das Unternehmen allerdings erst seinen Rivalen AMD ausstechen. Der stellte im August 2004 eine Doppelkernversion seines häufig verkauften Opteron-Prozessors vor, in diesem Jahr soll die Serienproduktion beginnen. Unterdessen arbeitet auch Sun Microsystems fieberhaft an der Entwicklung eines »Niagara« genannten Chips für Netzwerkserver, der sogar über acht identische Prozessorkerne verfügen soll.

Die Aufgabe, einen Chip zu bauen, der zwei Herren zugleich dient, ohne in schlimmste Verwirrung zu geraten, ist so neuartig und schwer, dass man bei den üblichen Zielen – Miniaturisierung und Erhöhung der Komplexität – gewaltige Abstriche machen muss. Daher werden die beiden Prozessoren eines Dual-Core-Rechners zunächst einfacher gebaut und langsamer sein als die bisherigen Alleinherrscher – was den Verkäufern bereits jetzt Kopfschmerzen bereitet. Wie sollen sie das den Kunden vermitteln?

Auch wenn sich die Architektur ändert, die stete Verkleinerung der Schaltkreise soll planmäßig weiterlaufen. Bis Ende dieses Jahrzehnts sind Strukturbreiten von maximal 18 Nanometer (millionstel Millimeter) vorgesehen; der



MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON AMD

▲ Supercomputing wird für Heim-PC und Laptop bald kein Fremdwort mehr sein. Die nächste Generation rechnet mit zwei Prozessoren auf einem Chip (im Foto jeweils die unteren, strukturierten Bereiche eines Chips).

Prescott erreicht »gerade mal« 50. Und das bedeutet: Die Zahl der auf einem Chip untergebrachten Schaltkreise – die so genannte Transistorendichte – wächst und wächst (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. 70).

Hitzeentwicklung und wachsender Stromverbrauch setzen dabei jedoch enge Grenzen. Bereits heute liegt die maximale Leistungsaufnahme von Mikroprozessoren bei über 110 Watt, da Chiphersteller in den letzten Jahren stetig die Taktraten erhöht haben (siehe die obere Grafik, nächste Seite). Der größte Teil dieser Energie wird in Wärme umgewandelt. Ein neuer Pentium-4 hat pro Quadratzentimeter eine höhere Heizleistung als ein heißes Bügeleisen. Da Ingenieure die Transistoren immer dichter zusammenpferchen, dürfte sich die Betriebstemperatur auch in Zukunft weiter erhöhen.

Die Hauptaufgabe eines Transistors in einem digitalen Rechenwerk ist, den Stromfluss zuverlässig zu unterbrechen beziehungsweise passieren zu lassen. Vergleicht man diese elektronischen Elemente mit Wasserhähnen, mussten die Entwickler früher dafür sorgen, dass ein solcher Hahn drei- bis viermal gedreht wurde, um vollständig zu öffnen oder zu schließen. Heutige Transistoren hingegen gleichen Armaturen, die nur um wenige Grad nach links oder rechts gedreht werden müssen. Leider sind sie wegen dieser Empfindlichkeit nicht ganz dicht. Selbst im Sperrzustand fließt immer noch ein winziger Leckstrom von ungefähr 100 Nanoampere. Das klingt nach wenig, doch angesichts von vielen Millionen Transistoren auf einem Chip kommt einiges zusammen, und dabei entsteht wieder Wärme.

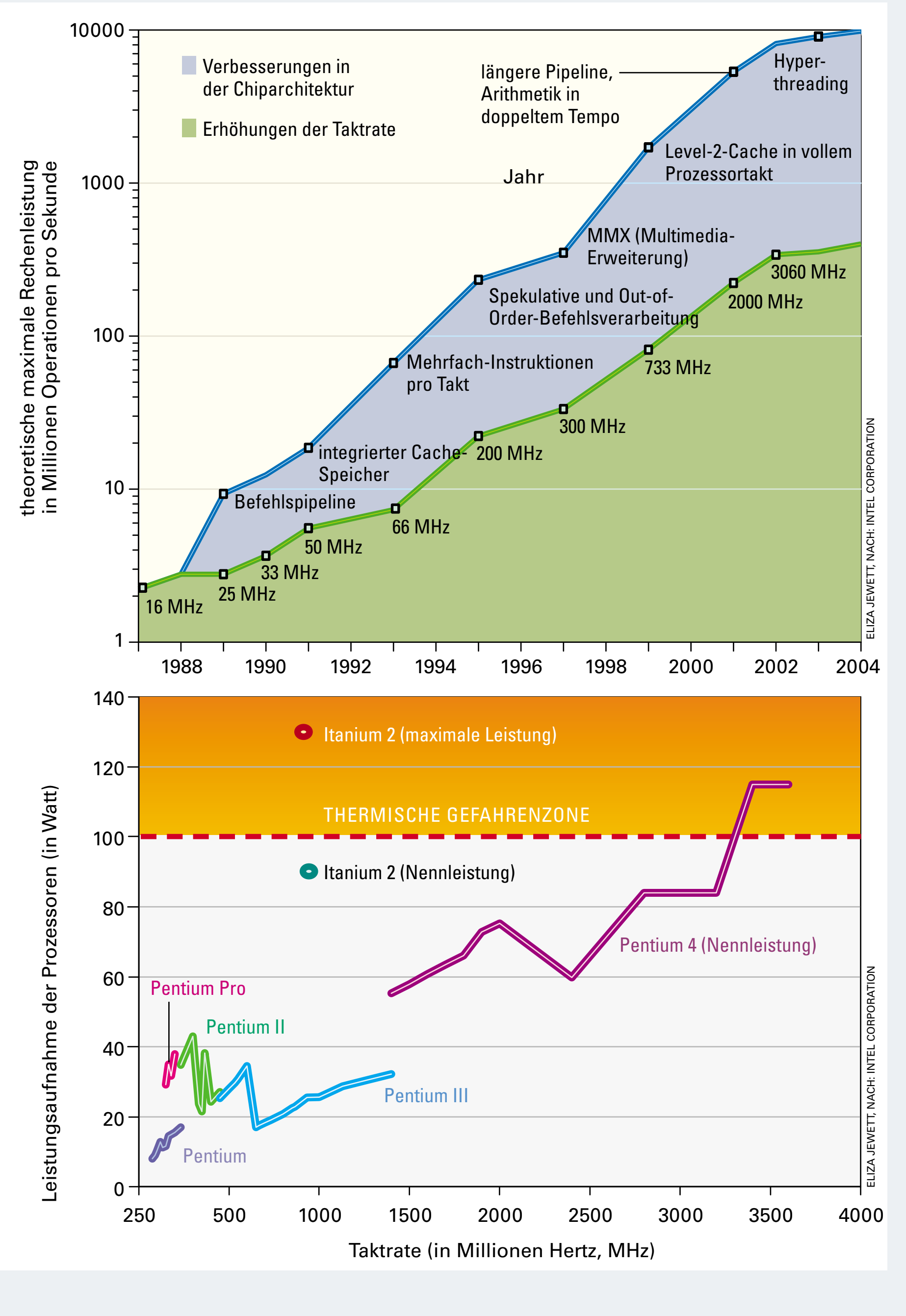
»Ab einer bestimmten Wärmeleistungsdichte, vermutlich ab 100 Watt pro Quadratzentimeter, ist das Silizium starken Belastungen ausgesetzt«, erklärt Stephen S. Pawlowski, Leiter des Mikroprozessor-Entwicklungslabors bei Intel. Dank ausgeklügelter Kühlbleche und Lüfter bleiben Mikroprozessoren heute noch deutlich unterhalb dieses thermischen Limits. »Doch es wird immer schwieriger und teurer, die Hitze aus dem Gehäuse zu bekommen.« Intel könnte von seinen Kunden, den Computerherstellern, verlangen, von Lüftkühlung auf Flüssigkeitskühlung umzustellen. Apple wählte diese Option in seinem neuen Power Mac G5. Doch ein solches System ist aufwändig und erhöht deshalb die Kos- ▷

ten. Das könnte sich nachteilig auf das Geschäft auswirken: Dass Intel derzeit ungefähr 50-mal mehr Pentium-4-Systeme verkauft wie Apple Computer mit G5-Prozessoren, liegt im Wesentlichen am stolzen Preis des letzteren.

Wärme und Stromverbrauch sind indes nicht die einzigen Probleme. Damit Information von einem Ende des Chips zum anderen gelangt, müssen Elektronen durch eine Leitung fließen. Zwar werden die »Drähte« in den Chips und damit die Signalwege immer kürzer, sie geraten aber auch immer dünner. Dadurch wachsen der elektrische Widerstand und die Leitungskapazität, was die Elektronen ausbremst.

Besonders nachteilig wirkt sich dies auf die relativ langsame Verbindung zwischen Prozessor und Arbeitsspeicher aus. Ein moderner Mikroprozessor führt mit jedem Ticken seines internen Taktgebers mehrere Befehle aus, und bei 3,6 Gigahertz gibt es 3,6 Milliarden solcher Zyklen pro Sekunde. Aber es braucht ungefähr 400 Takte, um Informationen aus dem Arbeitsspeicher zu holen. Schnelle Zwischenspeicher im Prozessorchip, so genannte Caches, lösen derzeit das Problem und erlauben sogar eine Art Parallelisierung – während das Rechenwerk bei Befehl A noch auf das Eintreffen von Daten wartet, arbeitet es bereits die Befehle B und C ab. Doch diese Technik ist nahezu ausgereizt. »Wir haben das Gesetz des Quadrats gegen uns«, erklärt Justin R. Rattner, Leiter der Entwicklungsabteilung Systemtechnologie bei Intel. »Man benötigt einen exponentiellen Zu-

Datenlogistik und Wärmemanagement für schnellere Rechner



Die kontinuierlich wachsende Leistung der Prozessoren beruhte bislang einerseits auf der wachsenden Taktrate, mit der Transistoren auf dem Chip schalten, andererseits auf immer ausgefeilteren Strategien zur Datenvorhaltung. Diese Grafik von Intel listet die wichtigsten Maßnahmen der »Datenlogistik« auf. Muss ein Prozessor auf die Abarbeitung einer Instruktion warten, um zwischen einem von zwei möglichen Folgebefehlen zu entscheiden, beschreitet er zum Beispiel bei der *speculative execution* beide Wege und überprüft erst dann, welcher richtig war. Die *out-of-order-execution* ermöglicht alternativ dazu, in der Wartezeit andere Aufgaben abzuarbeiten. Weitere Gewinne an Rechenleistung erwarten Fachleute künftig von der Verknüpfung mehrerer parallel arbeitender Prozessoren auf einem Chip.

Intel-Prozessoren der neuesten Generationen – Pentium 4 und Itanium 2 – können mitunter mehr Abwärme erzeugen, als bisherige Kühlsysteme abführen. Spezielle Schaltkreisen überwachen deshalb die Prozessortemperatur und senken gegebenenfalls die Taktrate ab. Zukünftige Intel-Prozessoren werden über mehrere Kerne verfügen, die jeweils langsamer arbeiten. Dadurch erzeugen sie zum einen weniger Abwärme, zum anderen wird diese gleichmäßiger auf der Oberfläche des Chips verteilt.

wachs der Transistorenzahl, damit aber der Chipfläche und beim Stromverbrauch, um auch nur geringe weitere Verbesserungen bei der parallelen Befehlsverarbeitung zu erreichen.«

Daher also der drastische Strategiewechsel. Weil die nach wie vor steigende Transistorendichte für die Parallelisierung kaum etwas einbringt, nutzen die Ingenieure sie auf neue Weise: Sie teilen den Chip in mehrere Kerne und erreichen so eine effektivere Parallelverarbeitung. Künftig sollen etwa 70 Prozent der Leistungssteigerung von einer Rechnergeneration zur nächsten aus Verbesserungen der Prozessorarchitektur resultieren. Zwar werden die Taktraten auch weiterhin steigen, doch langsamer als bislang. Dementsprechend hat Intel kürzlich seine Prozessorbezeichnungen geändert: 15 Jahre lang führten sie ihre Mega- oder Gigahertz-Taktung im Namen, nun dienen abstrakte Zahlen als Kennung.

Zwei Kerne sind natürlich nur der Anfang, der Marktführer denkt an vier bis acht in naher Zukunft, seine Forschungsabteilung konzipiert Superrechner mit mehreren hundert Cores. Im Prinzip können zwei Prozessoren immer mehr ausrichten als einer – wenn sie gut kooperieren. Dazu müsste ein Programm in Threads genannte Aufgaben unterteilt sein, die gleichzeitig in verschiedenen Kernen abgearbeitet werden. Gerade nicht benötigte Einzelprozessoren würden kurzzeitig abgeschaltet, um den Stromverbrauch zu verringern.

Der neue Trend: Arbeitsteilung auf dem Chip

Firma	Entwicklungsstand bei Multi-Kern-Prozessoren
AMD	Im August präsentiert ADM einen Dual-Core-Prozessors (siehe Bild S. 91); der Chip soll im nächsten Jahr auf den Markt kommen.
Cisco Systems	Ein im Mai vorgestellter Netzwerk-Router verfügt über Prozessoren mit 192 Kernen, die pro Sekunde 1,2 Billionen Bits an Internetdaten verarbeiten können.
IBM	verkaufte 2001 den ersten Dual-Kern-Prozessor – den Power4; der im Mai 2004 eingeführte Power5 besitzt ebenfalls zwei Kerne.
Intel	Der Marktführer testet einen Prototyp mit zwei Kernen namens Montecito; kommende Mikroprozessoren für den Desktop- und Serverbereich sollen stets mehrere Kerne haben.
Sun Microsystems	Der im Februar präsentierte Ultra-Sparc-IV-Prozessor arbeitet mit zwei Kernen, der für Anfang 2006 angekündigte Niagara soll bereits acht haben.

Die Kehrseite der Medaille

Nur können die meisten der existierenden Programme mit den neuen Möglichkeiten nichts anfangen, weil ihre Arbeit nicht ohne Weiteres in Threads zu zerlegen ist. Also wird ein Multi-Core-Prozessor vielleicht zunächst aus einem großen Kern bestehen, auf dem die herkömmlichen Programme laufen, und kleineren für neu konzipierte Software. Doch das kann nur eine Notlösung sein. Allerdings schätzen Experten, dass die Softwareentwickler noch lange brauchen, bis Programme mit geeigneter Architektur auf dem Markt sind. Denn es gibt nur sehr wenige Fachleute mit entsprechender Erfahrung.

»In ihrer nun 40-jährigen Geschichte hatte die Parallelverarbeitung immer damit zu kämpfen, dass die Programmierung sehr unanschaulich ist«, erläutert David J. Kuck, Leiter der KAI Software Labs, einer Firma, die Intel gekauft hat, um den Übergang zum neuen Design zu erleichtern. »Wenn Threads ineinander greifen und Daten austauschen, verliert jeder Entwickler den Überblick.« Auch das Fehlersuchen wird zum Problem. »Ein in Threads ablaufendes Parallelprogramm ist nicht deterministisch«, sagt Kuck. »Es kann sich einmal so verhalten und beim nächsten Mal wieder anders, je nachdem, ob ein Prozessor dem anderen ein bisschen zuvorkommt oder nicht. Deshalb wollen die meisten Softwareentwickler damit nichts zu tun haben.«

Manche Tätigkeiten sind schlicht nicht für die Parallelisierung geeignet, einerlei wie sie programmiert werden. Die meisten Anwendungen dürften aber nach erfolgreicher Umstellung auf Multikernchips erheblich schneller laufen. Soll etwa ein mit der Videokamera aufgenommener Film in das DVD-Format übertragen werden, so ließen sich aufeinander folgende Filmbilder gleichzeitig konvertieren. Auch computergenerierte 3-D-Szenen, Fotobearbeitung, wissenschaftliche Simulationen und Datenbanksuche gewännen an Tempo. Doch wie viele Kerne sind wirtschaftlich sinnvoll? Nicht mehr als acht für Standardanwendungen, schätzt Intel.

Und damit wären wir beim letzten Problem der Mikroprozessor-Industrie: Heute schon arbeiten Computer mehr als schnell genug, um die meisten Aufgaben zu bewältigen. Die Nachfrage nach schnelleren Rechnern hat im vergangenen Jahr bereits leicht nachgelassen. Doch Ende 2006 sollen 70 Prozent der Desktopcomputer und Notebooks sowie 85 Prozent der Server damit ausgestattet sein – wünscht sich Intel. Werden professionelle Nutzer wirklich umsteigen, wenn die nächste Generation mit vier Kernen schon vor der Tür steht? Wie reagiert der Massenmarkt? Wie viel werden Softwarefirmen für das Upgrade von Seriell- auf Parallelverarbeitung berechnen? Manch einer mag zu dem Schluss kommen, dass die neue Technik den Aufwand derzeit nicht lohnt. Andererseits lehrt die noch kurze Computergeschichte, dass mehr Leistung ihren Markt findet – oder den Bedarf selbst generiert. ◁

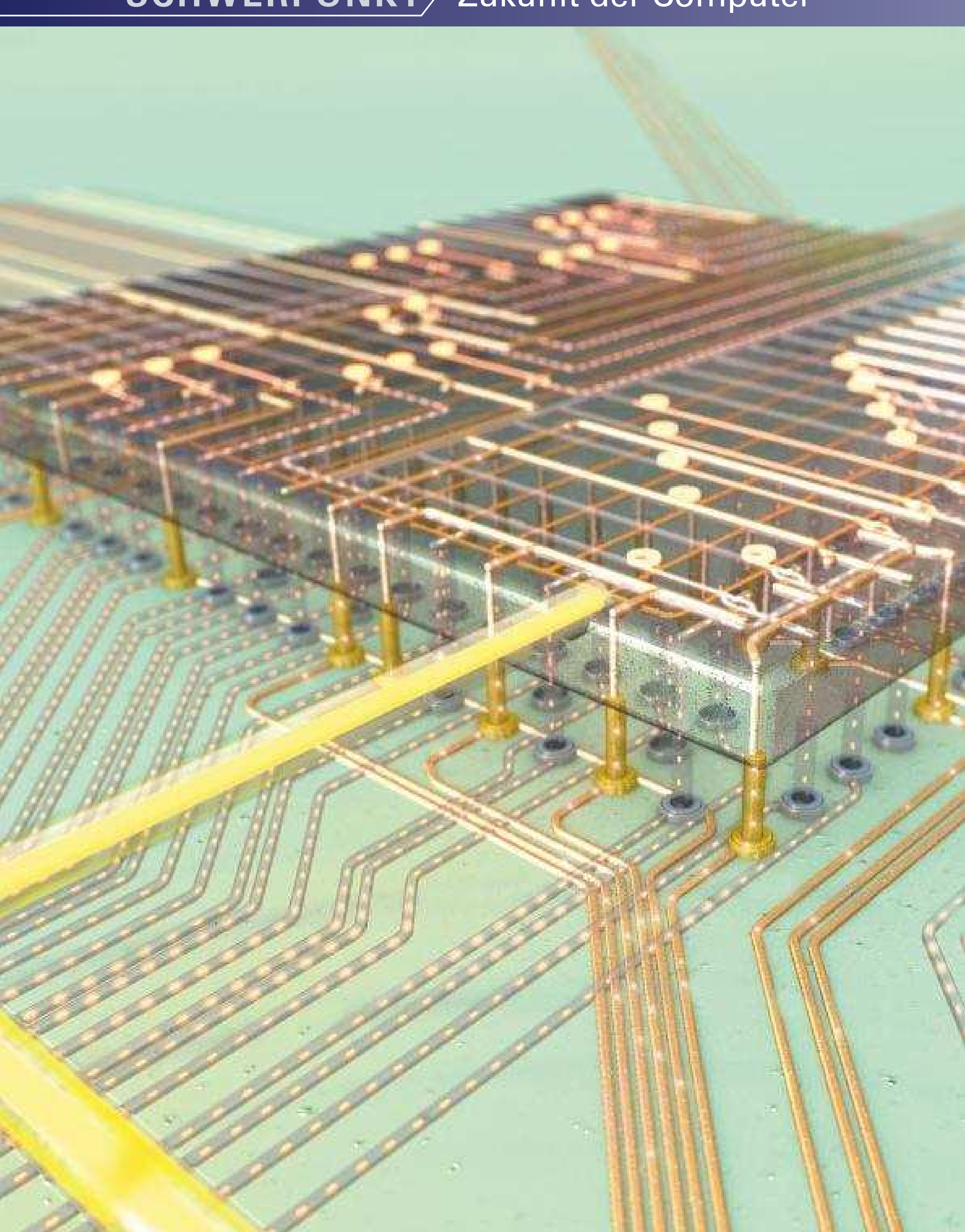
AUTOR UND LITERATUR

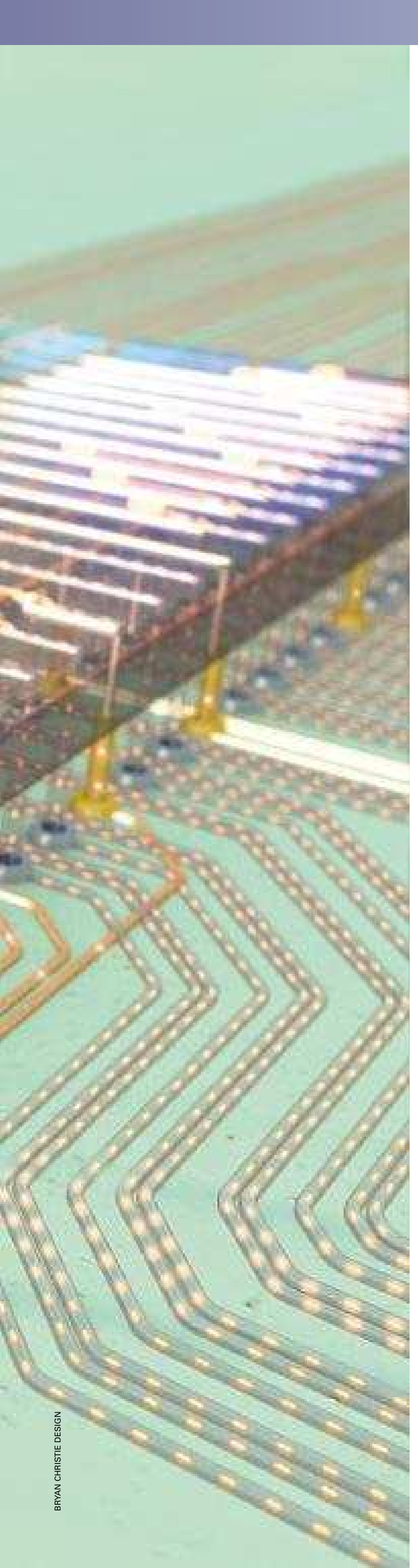


W. Wayt Gibbs ist Redakteur bei Scientific American.

Architecting the era of tera. Intel Research and Development, 2004. Im Internet unter ftp://download.intel.com/labs/nextnet/download/Tera_era.pdf

International technology roadmap for semiconductors. International Sematech, 2003. Im Internet unter http://public.itrs.net/Files/2003ITRS/Home2003.htm





BRYAN CHRISTIE DESIGN

Rechnen mit Lichtgeschwindigkeit

In »photonischen« Computern sorgen für den Datentransfer zwischen den Mikrochips nicht mehr Strompulse, sondern Lichtquanten. Schon in zehn Jahren könnte diese Verknüpfung von Photonik und Elektronik den Computermarkt dramatisch verändern.

Von W. Wayt Gibbs

Seit rund zehn Jahren hat der Fortschritt der Mikroprozessoren alle anderen Computerkomponenten immer weiter hinter sich gelassen. Die neuesten Prozessoren arbeiten mit 3,6 Gigahertz (GHz, Milliarden Hertz); simple arithmetische Operationen laufen sogar doppelt so schnell. Aber die Verdrahtung der Hauptplatine, die den Prozessor mit seinen Speicherchips und anderen Systembestandteilen verbindet, lässt nur ein GHz oder weniger zu. Somit verschwendet das Gehirn der Maschine drei Viertel seiner Zeit damit, auf Instruktionen und Daten zu warten, die im Stau stecken.

»In den kommenden Jahren wird das Ungleichgewicht zwischen Prozessorleistung und Speicherzugriff einen kritischen Punkt erreichen«, warnte schon vor drei Jahren der Physiker Anthony F. J. Levi von der University of Southern California in einer ausführlichen Analyse. Er betonte, dass das Plastikmaterial in Leiterplatten hohe Frequenzen ausbremst: Mit jedem Anstieg der Taktrate um zwei GHz fällt die Intensität der Datensignale auf ein Zehntel ab. Denn mit der Taktrate steigen auch Stromverbrauch, Wärmeentwicklung und elektromagnetische Interferenzen – drei Dinge, die den Systemdesignern ohnehin besondere Kopfschmerzen bereiten. Das Industriekonsortium International Sematech schätzt, dass die Verbindungen zwischen Prozessor und Peripherie alle zwei Jahre ungefähr um zwei GHz schneller werden müssen, damit dieser Engpass sich nicht noch mehr verengt.

»Unsere Ingenieure möchten zwanzig GHz aus einem fünfzig Zentimeter langen Kabel herausholen«, sagt Michael Morse, Photonikforscher bei Intel. Nach dem Sematech-Szenario würden zwanzig GHz gerade für die Generation der 32-Nanometer-Chips ausreichen – nur drei Entwicklungsschritte nach den 90-Nanometer-Chips, die Anfang 2004 erschienen. Für Mark T. Bohr, Leiter der Prozessorarchitektur bei Intel, steht fest, dass seine Firma die 32-Nanometer-Generation im Jahre 2010 auf den Markt bringen wird.

Damit scheint die Bühne frei für photonische Datenübertragung mittels Laserstrahlung: Schon in zehn Jahren sollte sie herkömmliche Kupferleitungen ablösen. »Ich bin ein großer Anhänger von optischen Verbindungen auf Systemebene«, sagt Patrick P. Gelsinger, Leiter der Technikabteilung von Intel. Allerdings bezweifelt er, dass die Photonik ihren Vorzug – extrem hohe Geschwindigkeit – ausgerechnet auf dem kurzen Sprung zwischen Speicherchip und Prozessor entfalten wird. Wann genau der Übergang zur Photonik stattfin- ▷

◀ Ein künftiger Mikroprozessor könnte mit dem übrigen Computer sowohl mittels Licht als auch über Strom kommunizieren. Kürzlich erfundene Geräte – Mikrohohlraumlaser, optische Silizium-Modulatoren und durchsichtige Kunststoffsäulen – lassen sich im Prinzip kombinieren, um Bits nahtlos vom elektronischen Bereich in den photonischen und wieder zurück zu bewegen.

▷ det, bei welchen Verbindungen und zu welchem Preis, das wird vor allem davon abhängen, wie die photonischen Geräte fabriziert werden.

An der Peripherie eines Computersystems wechseln Daten schon heute oft zwischen elektronischer und photonischer Form, etwa auf dem Weg von und zu einer CD oder DVD, einem Bildschirm, einer optischen Maus, einer Kamera, einem Stereoverstärker oder einem Glasfasernetzwerk. Aber das Herz des Computers – Prozessor und Hauptspeicher sowie die Platine, die beides mit den verschiedenen Peripheriegeräten verbindet – bleibt bisher Elektronen vorbehalten.

Glasfaserleitungen sind schnell – aber teuer

Das hat einen simplen Grund: Optische Verbindungen sind zwar viel schneller als Kupferleitungen, aber auch zehn- bis hundertmal so teuer. Erst wenn Tausende von Telefonverbindungen herzustellen oder Milliarden von Internetpaketen zu verschicken sind, zählt Kapazität mehr als Kosten. Deshalb laufen Langstreckenverbindungen in reichen Ländern heute vorwiegend über Glasfaser – und darum hat die Firma Cisco in den letzten vier Jahren eine halbe Milliarde Dollar für die Entwicklung eines optischen Routers ausgegeben. Dieser Netzwerkknoten und Datenverteiler wurde im Mai 2004 in Betrieb genommen; seine 30 Glasfaserleitungen schaffen 60 Gigabit pro Sekunde (Gbps) – das reicht, um den Internetverkehr von 1,6 Millionen mit DSL ausgestatteten Haushalten zu bewältigen. Über Distanzen von mehr als 100 Metern ist die Schaltgeschwindigkeit von Licht unschlagbar. Aber für kurze Verbindungen, ob in Firmennetzwerken oder innerhalb eines Computergehäuses, behauptet sich immer noch Kupfer als unbestrittener König.

Erst jetzt rückt der Machtwechsel näher, denn es ist endlich gelungen, eine Vielzahl photonischer Geräte herzustellen, die in herkömmlichen Chipfabriken kostengünstig produziert werden können. »Wir wollen die Optik konsequent vorantreiben bis zur Übertragung von Chip zu Chip«, sagt Mario Paniccia, der bei Intel die Forschungsgruppe Silizium-Photonik leitet.

Wenn das gelingt, dürften Computer in zehn Jahren ganz anders aussehen als heute. Manches wird einfach nur viel kleiner und schneller sein. Videokameras und tragbare Videorecorder wird man per Glasfaser in die photonischen Nachfolger von USB-Anschlüssen stöpseln. Einige Rechner werden wahrscheinlich holografische Laufwerke haben, die auf einer Scheibe von der Größe einer CD hunderte Gigabytes zu speichern vermögen. Glückliche Besitzer eines Direktanschlusses zum internationalen Glasfasernetz hätten Internetverbindungen mit mehr als einem Gigabit pro Sekunde – rund tausendmal so schnell wie das heutige DSL und Kabelmodems.

Anderes wird sich noch dramatischer verändern. In der Praxis sinkt die maximale Geschwindigkeit elektronischer Verbindungen mit wachsender Kabellänge rapide. Darum müssen Speicherchips und Grafikkarten möglichst nahe an dem Prozessor sitzen, der sie mit Informationen versorgt. »Aber wenn man die Daten erst einmal im optischen Bereich hat, spielt die Entfernung keine Rolle«, betont Paniccia. »Eine billige optische Verbindung bleibt billig, ob sie nun einen Meter oder tausend Kilometer lang ist.« Viele Rechnerkomponenten, die heute eng zusammengepfercht in einem Computergehäuse sitzen, können prinzipiell über ein Auto, ein Gebäude oder eine ganze Stadt verteilt werden, wenn die Daten zwischen ihnen als Lichtpulse fließen.

IN KÜRZE

- **Die Übertragungskapazität der Kupferleitungen**, die heute die Komponenten in Computern verbinden, wird vermutlich schon innerhalb des nächsten Jahrzehnts an praktische Grenzen stoßen.
- **Um Mikrochips durch Licht zu verbinden**, brauchte man bis vor kurzem Laser und Detektoren aus exotischen Halbleitern. Solche Geräte rechnen sich nur für Nischenanwendungen, etwa Hochleistungsknoten für die Telekommunikation. Doch 2004 entwickelten Ingenieure neue photonische Geräte, die in herkömmlichen Chipfabriken billig herzustellen wären.
- Um Laserpulse zwischen **Mikroprozessoren und Leiterplatten** zu führen, wurden ebenfalls neuartige Techniken erforscht.
- **Das Erscheinungsbild des Computers** könnte sich durch photonische Bauteile radikal ändern, denn optische Verbindungen sind über kurze und lange Entfernungen gleichermaßen enorm leistungsstark.

Öffnet den Datenengpass!

Handelsübliche optische Chips, die etwa als Laser in CD-Playern und als Fotodetektoren für Schalter in der Nachrichtentechnik dienen, werden aus III-V-Halbleitern hergestellt. Diese Substanzen heißen so, weil sie Elemente aus der dritten Spalte des Periodensystems – wie Aluminium, Gallium oder Indium – mit einem Element aus der fünften Spalte – meist Phosphor, Arsen oder Antimon – kombinieren.

Auf den ersten Blick scheinen sich III-V-Chips ideal für die Photonik zu eignen. Da Elektronen darin schneller unterwegs sind als in Silizium, können III-V-Prozessoren bei viel höheren Taktraten arbeiten. Sie senden nicht nur aus Hohlräumen in ihrer Oberfläche Laserlicht aus, sondern verwandeln auch ankommende Lichtpulse blitzschnell in elektrische Signale. Deshalb haben die Photonikforscher zunächst mit III-V-Halbleitern versucht, optische Schaltkreise zu bauen.

Zum Beispiel hat eine Gruppe um Daniel Blumenthal und Larry Coldren von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara mittels Indiumphosphid einen »Photonenkopierer« konstruiert. Das Gerät empfängt photonische Bits einer bestimmten Wellenlänge, verstärkt sie, falls nötig, und übersetzt sie mit Hilfe eines abstimmbaren Lasers in eine andere Wellenlänge – ohne die Information jemals in elektronische Form umzuwandeln. Ein solches Gerät wäre für künftige photonische Computer höchst willkommen.

Aber leider sind III-V-Halbleiter im Vergleich zu Silizium heikle und widerspenstige Materialien – und darum teuer. Ein nach dem herkömmlichen CMOS-Verfahren *(complementary metal oxide semiconductor)* aus Silizium hergestellter Mikrochip kostet etwa fünf Dollar; doch für den gleichen Chip aus Indiumphosphid müsste man rund 500 Dollar auf- ▷

Der photonische Computer: Was gibt es schon und was kommt auf uns zu?

Schon heute verwenden Computer an ihrer Peripherie einige optische Geräte. Aber die photonischen Komponenten, die jetzt im Laborstadium oder kurz vor der Markteinführung sind, werden wahrscheinlich innerhalb der nächsten zehn Jahre in den Kernbereich der Rechner vordringen. Voraussetzung für diese Entwicklung ist allerdings, dass die Fabrikation photonischer Komponenten wesentlich billiger wird als sie es heutzutage noch ist.

Jetzt: Mikroprozessoren arbeiten mit drei Gigahertz (GHz) oder mehr, warten aber oft im Leerlauf auf Daten aus dem Arbeitsspeicher (*random-access memory*, RAM), der nur mit 0,4 GHz getaktet ist. Neuere Prozessoren können Daten über Mehrfachleitungen mit insgesamt bis zu 50 Gigabit pro Sekunde (Gbps) beziehen.
Als Prototyp: Photonische Verbindungen zwischen Speicher und Prozessor, die mit 1,25 Gbps pro Wellenleiter arbeiten.
In Labors: Neue Verfahren, bei denen Tausende von Kunststoffsäulen auf dem Prozessor angebracht werden. Dies erlaubt sehr schnelle elektrische und optische Verbindungen zur Hauptplatine.

Jetzt: Glasfasernetzwerke, die mit Datenraten bis zu 10 Gbps arbeiten. Aber die meisten Computer verwenden billigere elektrische Ethernet-Verbindungen mit nur 0,1 Gbps.
Als Prototyp: Optische Modulatoren, die bei Intel gebaut wurden, könnten zu erschwinglichen 2,5 bis 10 Gbps schnellen optischen Netzen führen.

Blu-ray- oder HD-DVD-Laufwerk
Glasfaser-Netzkabel
CD-Laufwerk
Arbeitsspeicher (*random-access memory*, RAM)
optischer Netzanschluss
Hauptplatine
Mikroprozessor
drahtlose Tastatur und optische Maus
holografisches Laufwerk
Videokamera

Im Jahr 2006: Das Unternehmen InPhase Technologies geht davon aus, dass sein erstes holografisches Laufwerk bis zu 200 Gigabytes (GB) Daten auf einer CD-großen Platte archivieren und mit 0,16 Gbps wieder auslesen wird.

Jetzt: Leitungsbündel verbinden Laufwerke, Netzwerkkarten und andere Komponenten mit bis zu 40 Gbps (2,5 Gbps pro Leitung).
Als Prototyp: Im Juli 2004 wurden optische Platinen vorgestellt, die über Plastikkanäle optische Verbindungen auf Leiterplatten herstellen. Sie arbeiten mit 8 Gbps pro Wellenleiter.

Jetzt: USB 2.0 verbindet eine Maus, eine Videokamera und andere Geräte mit dem Computer – mit ungefähr 0,48 Gbps und über Entfernungen bis zu fünf Meter.
In Produktion: Teure Glasfaserstecker der Firma Xanoptix übertragen Daten mit 245 Gbps über Entfernungen bis zu 500 Meter.

Jetzt: DVD-Laufwerke schreiben und überschreiben bis zu 8,5 GB auf zweischichtige Scheiben und lesen sie mit maximal 0,13 Gbps wieder aus.
In Produktion: Blu-ray- und HD-DVD-Rekorder speichern bis zu 50 GB auf einer Platte und übertragen Daten mit 0,04 Gbps – wobei dieses Tempo bald auf 0,32 Gbps steigen soll.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

wenden. Außerdem bleibt die Entwicklung von Siliziumchips keinswegs stehen. »Wer gegen das gängige CMOS-Verfahren konkurrieren will, legt sich praktisch auf die Schienen«, klagt Ravindra A. Athale, der Photonikprogramme an der amerikanischen Militärforschungsagentur Darpa *(Defense Advanced Research Projects Agency)* leitet: »Früher oder später überrollt einen der Zug.«

Auf diesen Zug muss die Photonik aufspringen. Nur so kann sie jemals ihren Weg auf Hauptplatinen finden, die nicht mehr als hundert Dollar kosten. Deshalb hat sich die Forschung in den letzten Jahren darauf konzentriert, elektronische und photonische Bauteile auf eine Weise zu integrieren, die sich mit dem CMOS-Verfahren verträgt – und diese Strategie beginnt sich auszuzahlen.

»Wir haben ein Stadium erreicht, das noch vor zwei Jahren undenkbar war«, sagt Salvatore Coffa, Leiter des Silizium-Photonik-Labors der Firma STMicroelectronics in Catania auf Sizilien. »Wir denken daran, demnächst das erste Gerät mit optischen Funktionen auf Siliziumbasis anzubieten.«

Alles einsteigen in den CMOS-Express!

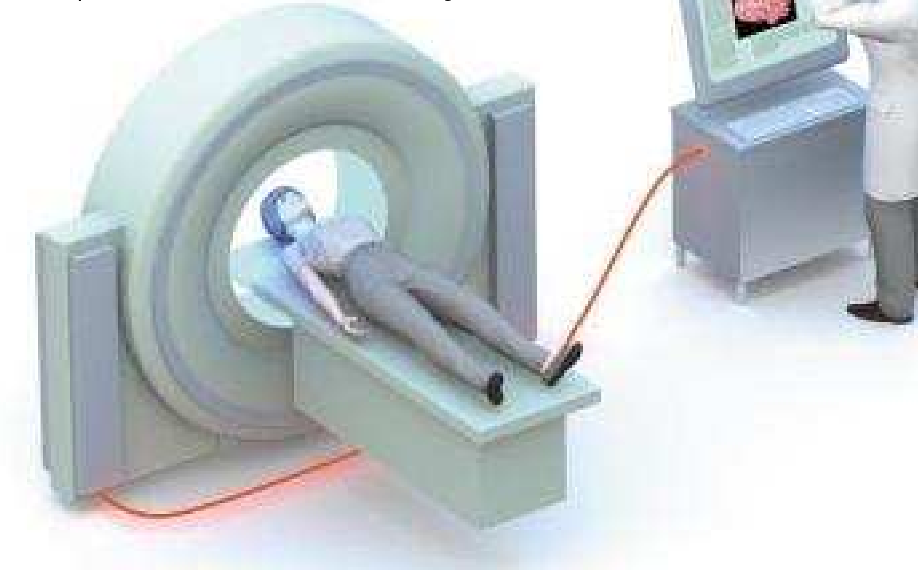
Es gibt mindestens drei Möglichkeiten, photonische Komponenten in den CMOS-Zug zu setzen – und jede davon hat beeindruckende Fortschritte gemacht. Der konservativste Ansatz, die so genannte hybride Integration, ist dem kommerziellen Erfolg am nächsten. Damit wurden bereits Chips für die Telekommunikationsindustrie hergestellt.

Hybridgeräte vereinen auf engstem Raum Siliziummikrochips für logische Operationen mit III-V-Chips für alle optischen Aufgaben. Allerdings müsste eine gemeinsame CMOS-Fabrik völlig umgebaut werden, denn Galliumarsenid oder Indiumphosphid sind buchstäblich Gift für die viele Milliarden Dollar teuren Anlagen zur Herstellung von Siliziumchips. Darum werden die unterschiedlichen Komponenten eines Hybridgeräts besser in separaten Fabriken hergestellt und erst dann zusammengebaut.

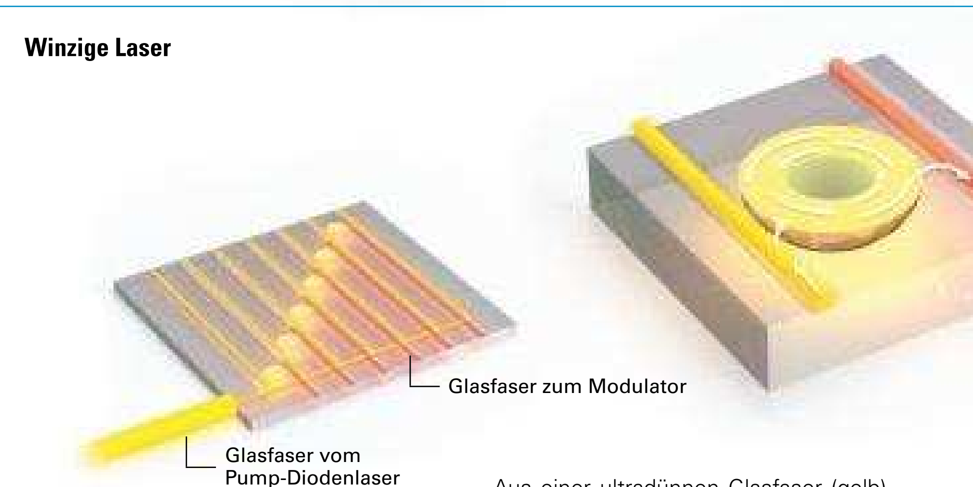
Xanoptix, ein kleines Start-up-Unternehmen in Merrimack (New Hampshire), hat auf diese Weise Galliumarsenidlaser mit Siliziumsteuerchips gepaart. Das Ergebnis ist ein daumengroßes optisches Verbindungsstück, das einem ▷

Vom Kupferdraht zum Wellenleiter

Photonische Mikrochips werden wahrscheinlich zuerst in Spezialcomputern eingesetzt werden, die riesige Datenmengen verarbeiten müssen – zum Beispiel für bildgebende Verfahren in der Medizin. Ein Kernspintomograf könnte eines Tages neue Typen von mikroskopischen Lasern (unten links) und Silizium-Modulatoren (unten Mitte) verwenden, um seine Bilder per Glasfaser zu einem Computer zu senden. Neu entwickelte Steckertypen vermögen riesige Datenmengen direkt zum Prozessor zu übermitteln (unten rechts). Mit Hilfe solch superschneller Verbindungen können Ärzte sich zum Beispiel besser mit weit entfernten Kollegen beraten.

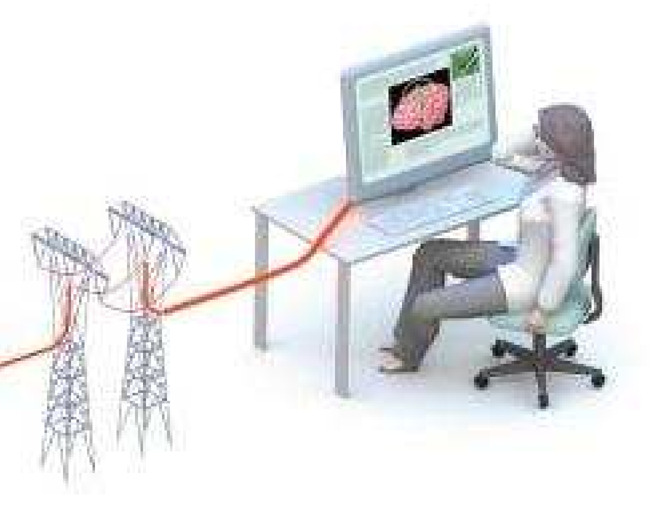


Winzige Laser

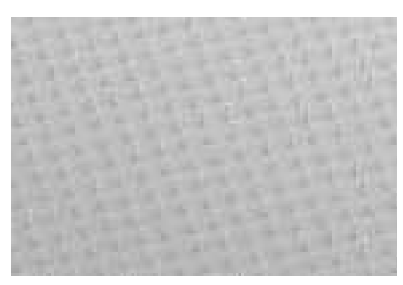


Solche Mikrolaser, die Kerry J. Vahala am California Institute of Technology entwickelt hat, können zu Tausenden auf üblichen Siliziumchips fabriziert werden. Die winzigen Ringe vermögen Licht, das ein billiger Diodenlaser liefert, zu reinigen und seine Farbe an die von anderen photonischen Komponenten verwendete Standardwellenlänge anzupassen.

Aus einer ultradünnen Glasfaser (gelb) dringt Licht in den Ring. Eine bestimmte Resonanzfrequenz wird im Ring verstärkt (Pfeile) und stimuliert ihn, einen Laserstrahl in eine andere Faser zu emittieren (rot). In der Praxis würden die Ringlaser wahrscheinlich an den Rändern von Löchern liegen und die optischen Verbindungsfasern wären in die Chipoberfläche eingebettet.

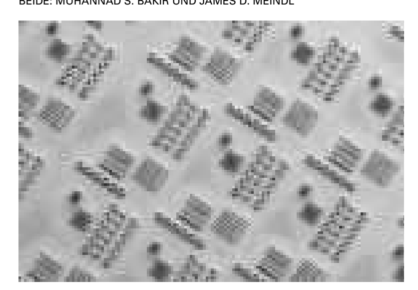


Photonisch verbundene Mikroprozessoren

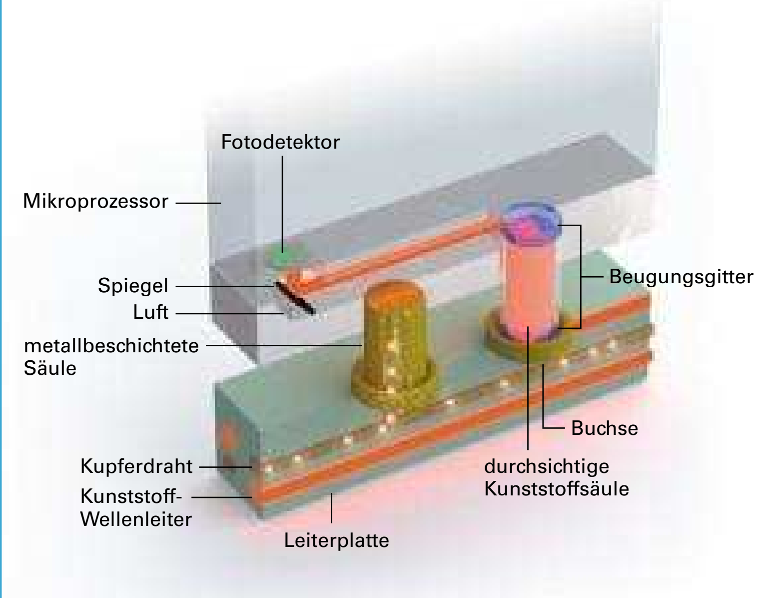


Tausende winzige Säulen aus durchsichtigem Plastik auf der Unterseite der Mikroprozessoren können als optische Verbindungen zur Leiterplatte dienen. Diese Technik wurde von James Meindl am Georgia Institute of Technology entwickelt.

BEIDE: MUHANNAD S. BAKIR UND JAMES D. MEINDL

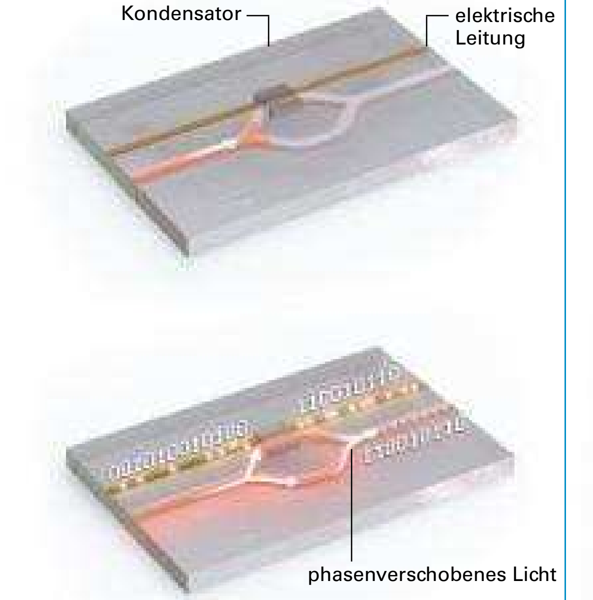


Die Säulen passen in entsprechende Buchsen auf der Oberfläche der Leiterplatte.



Sowohl elektronische als auch photonische Signale können die Säulen passieren und Daten zwischen Mikroprozessor und Leiterplatte transportieren. Übliche elektrische Verbindungen werden zwischen Drähten und metallbeschichteten Säulen hergestellt. Die Lichtpulse fließen durch Wellenleiter aus Kunststoff, werden durch Beugungsgitter aus Plastik oder durch metallische Spiegel abgelenkt und durch Siliziumfotodioden ausgelesen.

Modulieren optischer Signale



Ein von Mario Paniccia bei Intel entwickelter optischer Modulator übernimmt digitale Daten in elektrischer Form und überträgt sie auf einen Lichtstrahl. Zunächst wird der Strahl in zwei Teile aufgespaltet (oben). Die digitalen Stromsignale passieren je einen Kondensator (hier ist nur einer gezeigt) und verändern dabei die Phase des hindurchlaufenden Lichts. Wenn sich die Teilstrahlen wieder vereinen, interferieren die phasenverschobenen Lichtstrahlen und bilden digitalisierte Lichtpulse.

ALLE GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ USB-Stecker ähnelt. Aber während aus USB-Kabeln weniger als 0,5 Gigabit pro Sekunde tröpfeln, pumpt der photonische Stecker angeblich bis zu 245 Gbps durch ein bleistiftdickes Bündel aus 72 Glasfasern.

Der hybride Ansatz steht freilich auf lange Sicht vor dem Problem, dass Mikroprozessoren mit steigendem Rechentempo immer wärmer werden. Die heißesten Stellen auf manchen Chips übersteigen schon 80 Grad Celsius; bei dieser Temperatur beginnen III-V-Laser kaputtzugehen. Deshalb können hybride optoelektronische Chips nicht das Herz des Computers erobern, sondern nur eine Nische in langsameren externen Verbindungsstücken und Peripheriegeräten besetzen.

Silizium wird zum photonischen Material

Intel hat seine Wissenschaftler angewiesen, bei CMOS zu bleiben – in der Hoffnung, die vorhandenen Fabriken könnten eines Tages ganze photonische Systeme direkt in Mikroprozessoren oder Hauptplatinen einbauen. Damit diese so genannte monolithische Integration funktioniert, haben die Ingenieure Silizium und einige andere CMOS-verträgliche Elemente dazu gebracht, Licht zu emittieren, zu manipulieren und auszulesen.

Dieser erste Schritt ist ein Riesenerfolg: »Wir glauben, wir können mit Silizium alles bauen – außer dem Laser«, meint Paniccia. Silizium hat zwar an sich nicht die quantenmechanischen Voraussetzungen, um Licht zu erzeugen, aber Coffas Gruppe bei STMicroelectronics hat einen Weg gefunden, dieses Problem teilweise zu umgehen. Indem die Forscher ein klein wenig Cer oder Erbium in eine mit Siliziumnanokristallen durchsetzte Siliziumdioxidschicht einbrachten, bauten sie Chips, die beim Anlegen einer kleinen Spannung grün oder blau leuchteten.

Da die Lumineszenz inkohärent ist, handelt es sich nur um Licht emittierende Dioden (LEDs), nicht um Laser. »Aber ihr Wirkungsgrad ist so hoch wie der von Galliumarsenid-LEDs«, berichtet Coffa, und weil sie CMOS-kompatibel sind, »können wir sie direkt in bestehende elektronische Komponenten einbauen.« Noch im laufenden Jahr will STMicroelectronics Optokoppler auf Siliziumbasis einführen, mit denen Computer Hochspannungsanlagen zu steuern vermögen.

Die Silizium-LEDs könnten auch als Lichtquelle für einen CMOS-kompatiblen Laser dienen, den Kerry J. Vahala Anfang 2004 am California Institute of Technology vorführte. Vahala experimentierte mit mikroskopisch kleinen Scheiben aus Siliziumdioxid, die auf Siliziumstäben sitzen. Durch Glätten der Kanten und sorgfältige Kontrolle der Scheibendurchmesser erzeugte er das optische Äquivalent einer Flüstergalerie. Licht, das eine benachbarte Glasfaser passiert, dringt in die Scheibe ein und kreist darin immer weiter, wobei die Intensität um das Millionenfache ansteigt, bis es schließlich als Laserlicht emittiert wird (siehe Bild auf S. 98).

Die Scheiben können mit inkohärentem Licht von Leuchtdioden gespeist werden; sie könnten aber auch von außerhalb des Chips kommendes Laserlicht reinigen, auffrischen und auf eine neue Wellenlänge abstimmen. »Statt Scheiben herauszuätzen, könnten wir Löcher erzeugen. Der Laser würde sich dann auf dem Innenrand des Hohlraums bilden«, meint Vahala. Dadurch würde es einfacher, die Geräte mit Wellenleitern und anderen photonischen Komponenten auf der Oberfläche zu verbinden. »Diese Mikrohohlraumlaser könnten Trägersignale für die vom Chip ausgesandte Information liefern«, schlägt er vor.

Damit das funktioniert, müssen Techniker erst eine Methode finden, Information von elektronischer in optische Form zu übertragen. Bis vor einem Jahr war das in Silizium kaum möglich, weil sich Licht darin nur langsam und unsicher manipulieren lässt. Aber im Februar 2004 fand Paniccias Team heraus, wie man mit Silizium einen Laserstrahl 50-mal schneller zu modulieren vermag – das heißt, ihn dazu bringt, im Takt mit einem digitalen Signal zu flackern.

Zweimal Schwarzenegger

»Da sitzen rund hundert Modulatoren«, sagt Paniccia und hält einen briefmarkengroßen Siliziumchip hoch. Wir sind im Optics Lab 1A am Intel-Forschungszentrum in Santa Clara. »Und dort arbeitet einer gerade«, fährt er fort und zeigt auf eine Workstation. Auf dem Computer läuft eine hoch auflösende DVD mit dem Spielfilm »Terminator 3«. Während die Maschine die Videosignale abarbeitet, sendet sie eine Kopie jedes Bits über ein Ethernetkabel in eine winzige Leiterplatte, die einen einzelnen Modulator enthält.

Das Gerät arbeitet mit Laserlicht, funktioniert aber nach dem Prinzip eines Mittelwellenradios (siehe Bild auf S. 99). Es spaltet den mikroskopisch kleinen Laserstrahl in zwei Teile auf. Unter jedem Zweig sitzt ein elektrisch mit dem Ethernetkabel verbundener CMOS-Kondensator, der statische Elektrizität speichert und abgibt. »Wenn diese Bereiche stark aufgeladen sind, beeinflussen die Elektronen das Licht«, erklärt Paniccia: Die Lichtwellen werden relativ zueinander phasenverschoben. Wenn die beiden Strahlteile sich wieder vereinen, interferieren sie derart, dass der Output-Strahl nach demselben Muster pulsiert wie die Bits der Videosignale.

Diese Pulse übertragen die Daten über eine einzelne Glasfaser, die so dünn ist wie ein Spinnenfaden, vom Chip zu einem Photodetektor, der zu einem zwei-

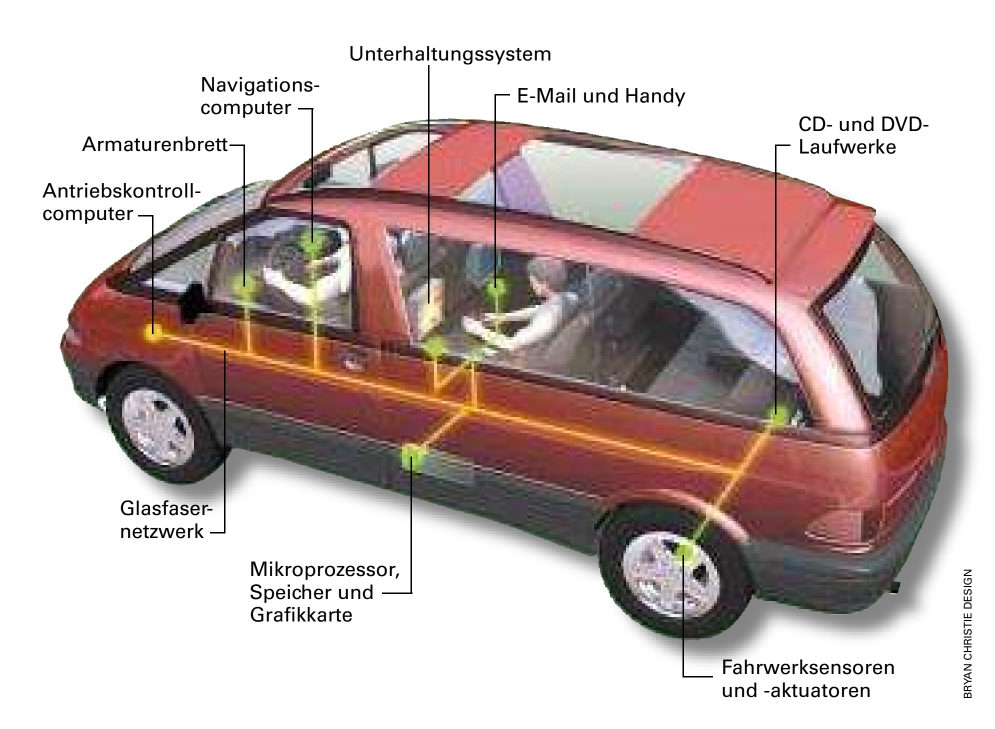
Die Photonik ändert das

Durch photonische Hochleistungsverbindungen wird es überflüssig, alle Computerkomponenten in einen einzigen Kasten zu packen. »Für ein elektrisches Signal ist es physikalisch etwas völlig anderes, ob es vier Meter oder vier Zentimeter zurücklegen muss«, bemerkt Ravindra A. Athale von der Defense Advanced Research Projects Agency, »aber im optischen Bereich machen vier Zentimeter oder vier Meter keinen großen Unterschied«. Deshalb können optisch verbundene Teile weiträumig verstreut sein und doch als eine einzige Maschine funktionieren.

In einem Auto könnten vielerlei Prozessoren, Speicher und Laufwerke hier und dort eingebaut und durch Glasfasern verbunden werden. »Ich verstehe, warum Daimler Chrysler schon 2005 gigabitschnelle optische Laserverbindungen für die Mercedes-S-Klasse plant«, sagt Athale.

In künftigen Büros kann im Prinzip jeder Mitarbeiter einen einzigen Computer nutzen, dessen Teile über das ganze Gebäude verteilt und durch optische Leitungen verbunden sind. Die Maschine lässt sich mit einem Tastendruck vorübergehend aufrüs-

Erscheinungsbild des Computers



BRYAN CHRISTIE DESIGN

ten, wenn eine bestimmte Anwendung einen schnelleren Prozessor oder mehr Arbeitsspeicher erfordert. Welche Folgen photonische Verbindungen für die Computerarchitektur haben werden, ist noch weit gehend spekulativ. »Die Systemarchitekten denken über so etwas erst nach, wenn es die Technologie tatsächlich gibt«, meint Athale. Aber diese steht vor der Tür.

ten, einige Meter entfernten Computer gehört. Die beiden Computer zeigen perfekt synchron, wie Arnold Schwarzenegger aus seinem Auto springt.

Bisher bewältigt der Modulator Taktraten bis zu 2,5 GHz. »Aber wir können ihn viel kleiner machen und zehn Gigahertz erreichen«, behauptet Paniccia. »Wenn wir all diese Elemente in einem einzigen Chip kombinieren, entsteht so etwas.« Er hält einen Ethernetstecker hoch: »Kleine optische Geräte aus Silizium, die man überall einstecken kann, und eine Netzwerkkarte für 250 Dollar, die einen 25 000 Dollar teuren Router ersetzt.«

Das Beste aus beiden Welten

»Wenn wir mit zehn Gigahertz senden wollen, müssen wir natürlich auch ebenso schnell empfangen können«, betont Photonikforscher Morse. Silizium ist für infrarote Wellenlängen, wie sie üblicherweise in photonischen Geräte verwendet werden, durchsichtig wie Glas. Aber wenn Germanium hinzugefügt wird – was Chiphersteller neuerdings ohnehin tun, um ihre Prozessoren schneller zu machen –, können CMOS-kompatible Fotodetektoren entstehen, welche das Licht wieder in elektronische Bits zurückverwandeln.

Als photonisches Material ist Silizium in den letzten Jahren ein gutes Stück vorangekommen. Aber es hat noch einen weiten Weg vor sich, bis es optische Daten mit mehr als 20 GHz zu verarbeiten vermag. Vielleicht wird sich deshalb ein neueres Verfahren zur Integration von Photonik und Elektronik als wirtschaftlicher erweisen: die so genannte polylithische Integration.

Die Idee dabei ist, auf der Hauptplatine einen CMOS-Prozessor zusammen mit einem dichten Netz sowohl optischer als auch elektronischer Verbindungen zu montieren. Dann könnten kleine – und damit relativ preisgünstige – III-V-Chips Licht in den Prozessor pumpen, und zwar aus sicherem Abstand, damit sie den Prozessor nicht überhitzen.

James D. Meindl und Muhannad S. Bakir vom Georgia Institute of Technology haben zusammen mit Anthony V. Mulé von Intel mehrere polylithische Prototypen erprobt. Einer davon heißt Leitungsmeer *(sea of leads)*: Tausende von mikroskopisch kleinen, s-förmigen Metallfedern werden im letzten Fertigungsschritt auf den Prozessor geätzt. Elektrische Signale fließen durch diese Federn; Lichtsignale jagen durch das Loch in ihrer Mitte und treffen Beugungsgitter, welche die Pulse zu Wellenleitern innerhalb des Chips oder der Hauptplatine ablenken.

In einem zweiten Modell ruht der Prozessor auf Tausenden von durchsichtigen Plastiksäulen, die in kreisförmige Plastikbuchsen auf der Leiterplatte passen (siehe Bild auf S. 99). Meindls Gruppe hat regelmäßige Anordnungen von Säulen mit nur fünf Mikrometer (tausendstel Millimeter) Durchmesser und zwölf Mikrometer Abstand hergestellt. Die Forscher haben auch gezeigt, wie einige Zylinder und Buchsen mit Metall beschichtet werden können, um elektrische statt optische Verbindungen herzustellen.

Ein Prozessor, aus dem Zehntausende solcher Säulchen ragen, könnte schon in zehn bis fünfzehn Jahren von infraroten Blitzen durchzuckt werden und gleichzeitig von hochfrequenten Strompulsen. Chipfabriken könnten in die Lücken zwischen Lasern und Wellenleitern Transistoren und Drähte ätzen. Endlich scheint sich die hartnäckige Kluft zwischen Laborphotonik und Unterhaltungselektronik zu schließen – zum Vorteil künftiger photonischer Geräte und ihrer Nutzer. ◁

LITERATURHINWEISE

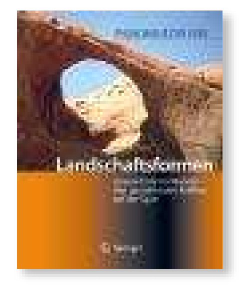
Silicon photonics. Von Lorenzo Pavesi und David J. Lockwood (Hg.). Springer, Berlin 2004

Sea of polymer pillars electrical and optical chip I/O interconnections for gigascale integration. Von M. S. Bakir und J. D. Meindl in: IEEE Transactions on electron devices, Bd. 51, S. 1069 (2004)

Ultralow-threshold microcavity Raman laser on a microelectronic chip. Von Kerry J. Vahala et al. in: Optics Letters, Bd. 29, S. 1224 (2004)

A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor. Von Mario Paniccia et al. in: Nature, Bd. 427, S. 615 (2004)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



GEOLOGIE

Harald Frater

Landschaftsformen

Unsere Erde im Wandel – den gestaltenden Kräften auf der Spur

Springer, Berlin 2005. 248 Seiten, € 29,95

Warum sind die meisten Mittelgebirge sanft gewölbt, während die Alpengipfel schroff in den Himmel ragen? Verrät die Sichelform einer Düne, in welche Richtung sie wandert?

Auf solche Fragen gibt das Buch von Harald Frater eine erste Antwort. Der studierte Geologe und Geograf, Geschäftsführer einer Firma zur multimedialen Popularisierung naturwissenschaftlicher Themen, hat mit seiner Redaktion eine Einführung in die Geomorphologie (Landschaftsformung) verfasst, die dem Leser plastisch das Thema nahe bringt, ohne ins Detail der Forschung zu gehen. Das Buch ist der dritte Band in der Reihe »Phänomene der Erde«, die Frater selbst herausgibt.

Mit den Planeten unseres Sonnensystems steigt der Autor in die Materie ein. Nach einem kleinen Crashkurs in Geologie geht es dann zur Sache: Wie kam der Polarforscher Alfred Wegener nur auf die Idee, dass sich die Kontinentalplatten gegeneinander verschieben? Welche Vulkantypen gibt es? Und wie gestalten Eis, Wasser und Wind, aber auch Erdbeben und Muren die Oberfläche der Erde? Im Schlusskapitel geht Frater kurz auf die menschlichen Eingriffe in die Landschaft und die Erschöpfung der natürlichen Ressourcen ein.

Mehr als 300 Fotos und Grafiken veranschaulichen die Bildung der Landschaftsformen, etwa wie Altwasserarme entstehen. Auch ein Glossar der wichtigsten Fachbegriffe ist nicht vergessen worden.

Doch so ansprechend das Buch auf den ersten Blick wirkt, so ärgerlich sind beim genaueren Hinsehen die kleinen Mängel. So vermisst man oft die Quelle von Zahlenangaben und bei vielen Fotos die Ortsangabe sowie einen Maßstab zum Größenvergleich. Im Abschnitt über Erdbeben fehlt rätselhafterweise die jedem Zeitungsleser vertraute Richter-Skala. Einige Zahlen stimmen nicht: Das Gletschereis der Antarktis ist nicht bis zu zwei Kilometer dick, sondern im Zentrum mehr als vier Kilometer. Der Himalaja würde vielleicht, wie behauptet, dramatische fünf Zentimeter pro Jahr in die Höhe wachsen, wenn der durch die Plattentektonik hervorgerufene Höhenzuwachs sich nicht alsbald durch die Erosion fast vollständig verkrümeln würde. Die Elster-Eiszeit verlegt der Autor gleich um mehrere hunderttausend Jahre zurück.

So taugt das Buch weniger zum Nachschlagen – eher schon als flüssig geschriebener, mit griffigen Beispielen versehener Appetitanreger.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

Sinterterrassen im Yellowstone-Nationalpark der USA

KRYPTOGRAFIE

Klaus Schmeh

Die Welt der geheimen Zeichen

Die faszinierende Geschichte der Verschlüsselung

W3L, Herdecke 2004. 360 Seiten, € 29,90



Schon nach 30 Seiten kann kein Leser mehr ernsthaft an der Wichtigkeit der Kryptografie zweifeln. Geheimschriften waren schon im 19. Jahrhundert kriegsentscheidend, und das Entschlüsseln geheimer Botschaften hat sogar geholfen, ein Rätsel der Geschichtswissenschaften zu lösen.

Das Buch gliedert 3500 Jahre Kryptografiegeschichte in drei Epochen. Deren erste, die Zeit der Verschlüsselung von Hand, überspannt den längsten Zeitraum, von der Antike bis zum Ersten Weltkrieg, nimmt aber in dem Buch den geringsten Platz ein, denn außer ein paar spannenden Geschichten gibt es zum Fortschritt der Kryptografie aus dieser Zeit nicht viel zu berichten.

In der zweiten Epoche, dem Zeitalter der Verschlüsselungsmaschinen, überschlagen sich dagegen die Ereignisse. Eine Hauptrolle spielt dabei die legendäre deutsche Chiffriermaschine »Enigma«, die im Zweiten Weltkrieg von den Briten entschlüsselt wurde. Nach allgemein akzeptierter Meinung haben die Deutschen an der Sicherheit der Enigma nie gezweifelt, weswegen dreißig Jahre später die Nachricht von der Entschlüsselung sie wie ein Schock traf (Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 26). Umso eindrucksvoller ist der Abschnitt »Hitlers letzte Maschinen« in Schmehs Buch, demzufolge diese Meinung in ihrer Allgemeinheit wahrscheinlich falsch ist. Die Epoche der Verschlüsselungsmaschinen zieht sich mit einigen spannenden Episoden bis in den Kalten Krieg hinein.

Die dritte Epoche ist die der Verschlüsselung mit dem Computer und einer ihrer Höhepunkte die Lösung des Schlüsselaustauschproblems, etwa durch die scheinbar paradoxe Kryptografie mit veröffentlichtem Schlüssel *(public key cryptography)*. Das Public-Key-Verfahren RSA dient als Beispiel für eine Funktion, deren Umkehrung nur mit einer »Falltür« (einer geheimen Zusatzinformation) möglich ist. Allerdings wird es in dieser Rohform heute nicht mehr angewandt. Vielmehr werden Nachrichten geschickt mit Zufallsdaten aufgefüllt, damit nicht gleiche Klartexte deterministisch immer auf denselben Chiffretext abgebildet werden. Selbst wenn der Angreifer schon einmal ein verschlüsseltes »ja« am Anfang eines Textes gesehen hat, kann er dasselbe Wort an derselben Stelle nicht wiedererkennen. Eine kleine Unstimmigkeit bei dem Zahlenbeispiel in der Box stört die Erklärung nicht.

In einigen Kapiteln geht das Buch auch über das eigentliche Thema Verschlüsselungsverfahren hinaus. So ist die digitale Unterschrift eine völlig neue Anwendung der altehrwürdigen Kryptografie. Schmeh bringt an dieser Stelle nicht nur die technischen Aspekte, sondern auch die interessanten rechtlichen und politischen Konsequenzen der digitalen Signatur. Beim gesellschaftlichen Aspekt der Kryptografie bespricht das Buch so aktuelle Ereignisse, dass die geschichtliche Darstellung in den Hintergrund tritt.

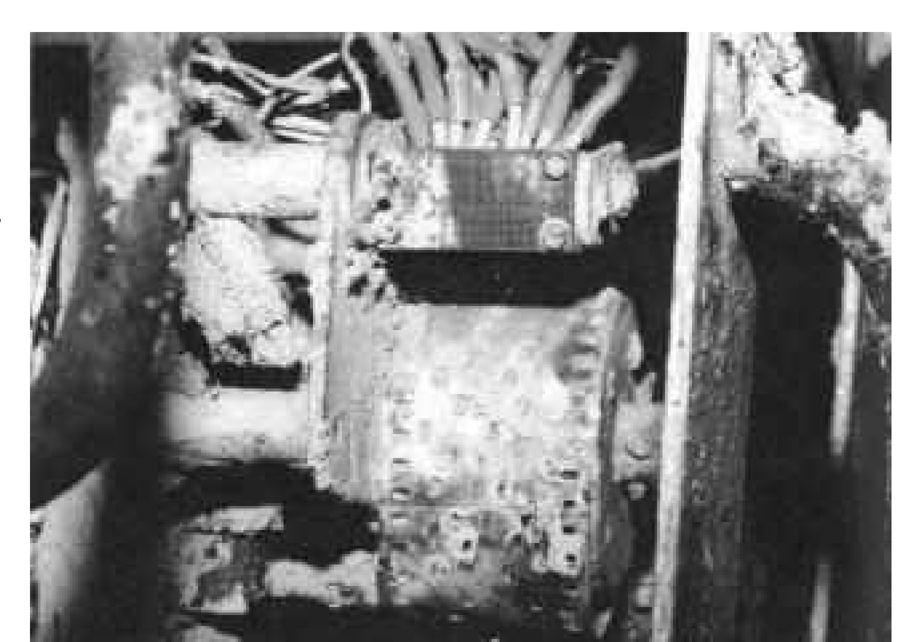
Hitlers letzte Maschinen bergen immer noch Rätsel

Das Buch beeindruckt durch eine große Vielfalt von Themen. So wird auch das Problem angesprochen, dass ein eigentlich sicheres Verfahren dadurch gefährdet sein kann, dass dem Angreifer Seitenkanäle der Information, wie etwa der Stromverbrauch einer Chipkarte, zur Verfügung stehen. Potenzielle Bedrohungen gegenwärtiger Verschlüsselungsverfahren sind der DNA-Computer und der Quantencomputer. Aber man hat die Aussicht, den Teufel mit dem Beelzebub auszutreiben, nämlich den Quantencomputer mit der Quantenkryptografie.

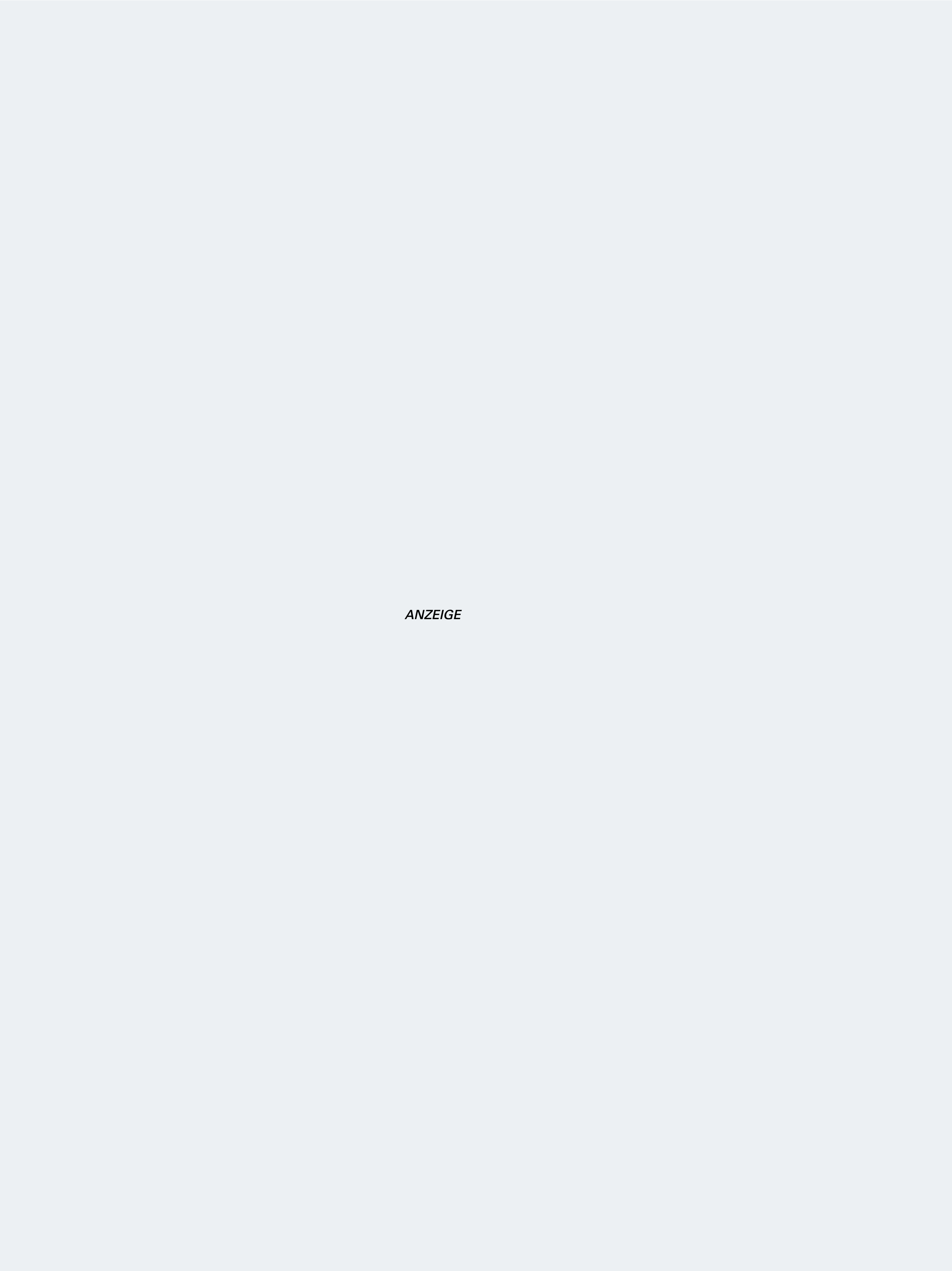
Nicht ausdrücklich in dem Buch angesprochen ist das Problem der Authentifikation von Nachrichten. Der Empfänger einer Nachricht muss sich vergewissern, dass ihr Sender der ist, der er zu sein vorgibt. Sonst könnte sich ein Übeltäter bereits beim Schlüsselaustausch unbemerkt zwischen die beiden Parteien drängen und von da an jede Kommunikation unter ihnen unentdeckt verfälschen.

Dagegen hilft auch das einzige nachweislich unknackbare Verschlüsselungsverfahren, der One-Time-Pad, nicht, da ein Angreifer gezielt »Bits kippen« und so die Nachricht, ohne sie zu entschlüsseln, verfälschen kann. Da selbst Fachbücher kaum auf dieses Problem hinweisen, wurde der One-Time-Pad bereits – nutzlos – in kommerzielle quantenkryptografische Programme eingebaut. Die in dem Buch besprochenen digitalen Signaturen können solche Probleme lösen, solange man nicht auf nachweislicher Unknackbarkeit besteht.

Schmeh widmet sich auch den so genannten Hash-Funktionen, die aus einer großen Datei eine kurze Kennnummer errechnen und damit etwa Signaturverfahren beschleunigen können, da es genügt, diese Kennnummer zu signieren. ▷



Kurz vor Kriegsende versenkten die Nazis im Toplitzsee im Salzkammergut (Österreich) eine kryptografische Maschine (hier ein Bauteil), deren Funktion bislang nicht bekannt ist.


ANZEIGE

Besonders interessant ist dabei die potenzielle Unsicherheit der Hash-Funktion MD5, die aus den Arbeiten des Bochumer Kryptologen Hans Dobbertin folgt, denn kurz nach Erscheinen des Buches wurde MD5 tatsächlich gebrochen.

Das Buch bietet nicht nur spannende Geschichten, sondern hat auch einen didaktischen Anspruch. Wichtige Begriffe werden am Ende eines Kapitels noch einmal kurz dargestellt, Randnotizen erlauben dem flüchtigen Leser einen raschen Wiedereinstieg. Ein Anhang bietet weitere Anregungen und zeigt einige noch ungelöste Fragen der Kryptografiegeschichte. Die schönsten der zahlreichen Bilder sind am Ende noch einmal in Farbe wiedergegeben.

Das Werk sei also auch vorinformierten Lesern wärmstens empfohlen. Wer vorab eine Leseprobe genießen möchte, findet sie unter http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/buch/17995/1.html und unter http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/co/18371/1.html einen Artikel über einen Zeitzeugen des deutschen Dechiffrierwesens im Zweiten Weltkrieg, der sich auf Grund des Buchs beim Autor gemeldet hat.

Jörn Müller-Quade

Der Rezensent ist promovierter Informatiker und arbeitet am Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme der Universität Karlsruhe.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Bill Bryson

Ein kurze Geschichte von fast allem

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
Goldmann, München 2004. 672 Seiten, € 24,90

Bekannt geworden ist er durch Reiseromane wie »Frühstück mit Kängurus« oder »Picknick mit Bären«. Jetzt hat Bill Bryson auf ein anderes Pferd umgesattelt: das der Sachbücher. Der gebürtige US-Amerikaner erzählt seinen Lesern – frei nach Woody Allen –, was sie schon immer über Naturwissenschaften wissen wollten, aber nie zu fragen wagten. Wesentliche Grundlagen der Erdgeschichte, Evolution, Astronomie, Chemie und Physik erläutert er auch für Nichtexperten in plastisch-anschaulicher Sprache.

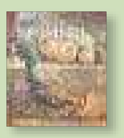
Der Titel spielt mit typisch britischem Understatement auf zweierlei an. Erstens auf den gemeinsamen Traum aller Physiker, eine alles umfassende Welttheorie zu entwickeln, zweitens und vor allem aber auf Stephen Hawkings »Eine kurze Geschichte der Zeit«. Selbstverständlich weiß Bryson, dass er es mit Hawkings Genie und dem wissenschaftlichen Rang seines Werks niemals aufnehmen kann. Doch im Gegensatz zu Hawking hat Bryson ein jederzeit für jedermann gut lesbares Buch geschrieben.

Die Kapitel sind entweder einem bestimmten naturwissenschaftlichen Thema gewidmet, etwa dem Atom oder der Supernova, oder der Evolution eines Fachs. So erzählt Bryson zur Astronomie, wie Edmond Halley 1705 die Bahn des später nach ihm benannten Kometen berechnete, Isaac Newton 1687 das allgemeine Gravitationsgesetz veröffentlichte und Henry Cavendish Ende des 18. Jahrhunderts durch Bestimmung der Gravitationskonstante die Erdmasse berechnete.

Er schildert die Anfänge der Geologie mit James Huttons (1726–1797) hoffnungslos kryptisch formulierten Meisterwerken, ihre Fortschritte unter Charles Lyell (1797–1875) und den misslungenen Versuch Lord Kelvins (1824–1907), das Alter der Erde zu berechnen. In der Chemie beschreibt Bryson drastisch, wie Henning Brand (1630–1710) bei dem vergeblichen Versuch, aus Urin Gold zu gewinnen, den Phosphor entdeckte. Es folgen die Systematisierung der Chemie durch Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794), die Einführung des Periodensystems durch Dmitrij Mendelejew 1869 und die Triumphe des Ehepaars Curie bei der Entdeckung der Radioaktivität.

Dabei war Bryson vor seiner Beschäftigung mit den Themen selbst ein blutiger Laie: »Ich wusste nicht, was ein Proton war oder ein Protein, konnte kein

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Filippo Coarelli (Hg.), Alfredo und Pio Foglia (Fotos)
Pompeji
Hirmer, München 2002, 407 Seiten, € 128,–

Filippo Coarelli, inzwischen im Ruhestand, ist als einer der produktivsten italienischen Archäologen, als Kenner der großen römischen Stätten und als Spezialist für römische Architektur und Stadtplanung bekannt. Unter seiner Ägide entstand dieser brillant bebilderte, großformatige Band über Pompeji: kein rein wissenschaftliches Buch, sondern ein Prachtband für den Wohnzimmertisch.

In diesem Werk werden 16 Stadthäuser umfassend dokumentiert. Darüber hinaus geht es um die urbane Entwicklung und um sozio-ökonomische Aspekte. Ergänzt um jüngste Forschungsergebnisse und unterlegt durch überlieferte Texte etwa von Plinius dem Jüngeren oder Vitruv, entsteht ein facettenreiches Bild einer antiken Stadt.

Aus der Rezension von Margit Brinke und Peter Kränzle



5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Vermittlung	■■■■
Verständlichkeit	■■■■
Lesespaß	■■■■
Preis/Leistung	■■
Gesamtpunktzahl	18

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**

Quark von einem Quasar unterscheiden«, bekannte Bryson freimütig gegenüber der englischen Zeitung »The Guardian«. Doch was in der Regel die Fachleute die Nase rümpfen lässt, erweist sich bei Bryson als entscheidender Vorteil: Er ist seinen uninformierten Lesern noch nicht so weit entrückt, dass er sich nicht mehr mit ihnen verständigen könnte. Mit subtiler Ironie, charmantem Witz und flirrend leichtem Understatement spricht der langjährige Wahlengländer auch diejenigen an, denen die Lust an der Wissenschaft in öden Unterrichtsstunden vergangen ist.

Dazwischen schildert er Menschlich-Allzumenschliches, Intrigen und Streitereien zwischen Kollegen ebenso wie freundschaftliche Hilfe und Unterstützung. Nebenbei erfährt der Leser Skurriles, so über Isaac Newton, der sich aus reiner Neugier mit einer Ahle in die Au-

Bryson konnte ein Quark nicht von einem Quasar unterscheiden

genhöhle stach, oder über Reverend William Buckland, einen der Väter der modernen Geologie, der seinen Gästen mit Vorliebe Mäuse im Schlafrock oder gebratene Meerschweinchen servierte.

Bryson hat ein satirisch-informatives Märchenbuch für Erwachsene verfasst. Dennoch gerät er nie in die Gefahr, ins Banale oder Unfachmännische abzurutschen, eine Leistung, die auch Fachleute bereits zu würdigen wussten: Für das vorliegende Werk erhielt er 2004 den begehrten Aventis-Preis für Wissenschaftsbücher, den vor ihm bereits der besagte Stephen Hawking und andere berühmte Wissenschaftsautoren wie Stephen Jay Gould entgegengenommen hatten.

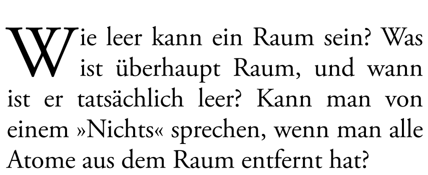
Interessierten Geistes- und Sozialwissenschaftlern sei dieses Buch wärmstens ans Herz gelegt. Doch auch Naturwissenschaftler, die gerne einen Blick über den Tellerrand des eigenen Fachbereichs werfen möchten, werden in Brysons dickleibigem, aber kurzweiligem Schmöker die eine oder andere intellektuelle Leckerei entdecken.

Denn »Eine kurze Geschichte von fast allem« ist vor allem eins: eine fulminante Wissenschaftsgeschichte, die Appetit macht auf größere Häppchen.

Stephanie Hügler

Die Rezensentin hat Soziologie und Psychologie studiert und ist freie Journalistin in Heidelberg.

KOSMOLOGIE

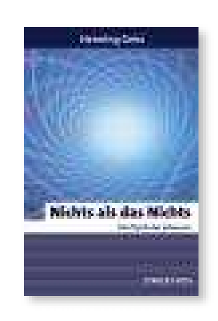


Henning Genz

Nichts als das Nichts

Die Physik des Vakuums

Wiley-VCH, Weinheim 2004. 266 Seiten, € 24,90



Wie leer kann ein Raum sein? Was ist überhaupt Raum, und wann ist er tatsächlich leer? Kann man von einem »Nichts« sprechen, wenn man alle Atome aus dem Raum entfernt hat?

Nicht wirklich, wie uns die moderne Physik lehrt. In der Quantenfeldtheorie gibt es keinen im Wortsinn leeren Raum. Selbst wenn man alle Atome entfernen, durch geeignete Abschirmung alle Strahlung von ihm fernhalten und ihn auf den absoluten Nullpunkt der Temperatur herunterkühlen würde, bliebe immer noch ein Rest Wärmestrahlung übrig. Auf der Ebene der Elementarteilchen ist der Vakuumzustand höchst dynamisch: Ständig laufen Prozesse ab, bei denen Teilchen erscheinen und wieder verschwinden. Wenn das Vakuum Higgs-Felder enthält, ist es paradoxerweise sogar energieärmer als ohne sie.

Dagegen steht das Konzept der Allgemeinen Relativitätstheorie, in der ein Raum theoretisch tatsächlich leer sein kann. Dabei ist heute noch nicht klar, wie die beiden physikalischen Sichtweisen miteinander zu verknüpfen sind. Denn bislang gibt es keine einheitliche Beschreibung der Welt des Großen, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie erfasst wird, und der des Allerkleinsten, das durch quantenmechanische Prozesse beherrscht wird.

Um sich dem Thema zu nähern, spannt Henning Genz, pensionierter Professor am Institut für Theoretische Teilchenphysik der Universität Karlsruhe, einen weiten Bogen von der Antike – schon Aristoteles hielt einen leeren Raum für unmöglich – bis zu den modernen Feldtheorien. Die komplexen mathematischen Strukturen, die hinter diesen Vorstellungen stehen, führt der Autor Schritt für Schritt ein. Aufbauend auf historischen Überlegungen und Experimenten verdeutlicht er, dass der Raum fast leer ist, aber angefüllt mit Feldern.

Auch Einsteins vierdimensionale Raumzeit der Allgemeinen Relativitätstheorie ist, wie man heute weiß, nicht wirklich leer. Vor einigen Jahren fanden Astronomen Hinweise auf die Dunkle Energie, eine Art potenzieller Energie des Universums, die zu einer beschleunigten Expansion des Alls führt. Noch ist unklar, wie sie mit dem quantenmechanischen Vakuum zusammenhängt.

Henning Genz liefert einen kompakten Überblick über den Stand der theoretisch-physikalischen Forschung, die gegenwärtigen Probleme, aber auch mögliche Auswege. Es ist kein leicht zu lesendes Buch. Im Gegensatz zu »Die Entdeckung des Nichts. Leere und Fülle im Universum« vom selben Autor ist dieser Band mit mathematischen Formeln gespickt. Nur wer ein paar Jahre theoretische Physik studiert hat, wird deshalb seinen Inhalt wirklich erfassen können. Dafür erhält er einen detaillierten, fundierten und lesenswerten Überblick. Leider enthält das Buch zwar ein Personen-, aber kein Sachregister.

Eine kleine Marotte leistet sich der Autor. Fast immer – bis auf wenige Ausnahmen – spricht er »die Leserin« an. Aber auch Männer dürfen das Buch lesen.

Hans Zekl

Der Rezensent ist promovierter Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Attendorn.



MATHEMATIK

Gunter Dueck

Das Sintflutprinzip

Ein Mathematik-Roman

Springer, Heidelberg 2004. 255 Seiten, € 22,95

Ein Erstlingswerk, vor zehn Jahren bereits von einem angesehenen Verlag abgelehnt, und als Thema ausgerechnet Mathematik – das scheinen drei sichere Voraussetzungen für einen soliden Misserfolg zu sein! Jedoch: Der Autor heißt Gunter Dueck, hat in dieser Zeitschrift den viel beachteten Artikel zum Sintflutalgorithmus veröffentlicht (3/1993, S. 42) und mehrere Erfolgsbücher geschrieben (»Wild Duck«, rezensiert in Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 101; »E-Man«, 9/2002, S. 114; »Omnisophie«, 11/2003, S. 88, und »Supramanie«, 4/2004, S. 101). Auch für Menschen – es soll solche geben –, die Spektrum der Wissenschaft nicht lesen, weckt der Name des Autors positive Assoziationen. Gunter Dueck schreibt regelmäßig für das »Informatik-Spektrum«, ist professioneller Mathematiker und arbeitet als Manager bei IBM.

In diesem Buch zeigt die Mathematik allerdings ihre Samtpfoten. Dueck schreibt einen guten Stil – in dieser Hinsicht ist er kein »typischer« Mathematiker –, sodass er auf Formeln weit gehend verzichten kann.

Es geht um eine Entdeckung, an der Dueck wesentlich beteiligt war, das Sintflutprinzip zur Optimierung; um das Verhalten der Menschen im Angesicht einer Bedrohung; und, wie man es bei Dueck erwarten darf, »um das Leben«.

Der Sintflutalgorithmus ist eine »heuristische« Methode. Man wendet sie auf Aufgaben an, die eigentlich gar nicht lösbar oder zumindest hoffnungslos schwierig sind. Dueck und seine Mitarbeiter haben den Algorithmus durch Intuition, durch Analogieschlüsse und durch Experimente gewonnen, nicht durch systematische Anwendung tiefsinniger Mathematik. Das Verfahren lebt im »theoriefreien Raum«. Gleichwohl erwies es sich als äußerst brauchbar für eine Reihe von praktisch wichtigen und schwierigen Aufgabenstellungen.

Für mich reizvoll ist der Teil des Buchs, in dem Dueck die Kommunikation mit den Praktikern schildert. Seine Probleme stammen vorwiegend aus dem Betriebsleben: Touren- und Beladungsplanung für Kraftfahrzeuge, Standortplanung von Lagern, Steuerung von Maschinen und so weiter. Immer geht es darum, unter »praktischen« Nebenbedingungen (besondere Kundenwünsche, Fähigkeiten der Fahrer, Termine …) eine kostengünstige Lösung zu finden. Derartige Bedingungen sind mathematisch

kaum fassbar, insbesondere wenn die Beteiligten nicht immer rational agieren, die äußeren Umstände sich rasch ändern oder erst im Laufe der Planung überhaupt bemerkt werden. Da beneidet man die Optimierer des neuen Containerzentrums in Hamburg-Waltershof: Auf dem ganzen Gelände gibt es kaum Menschen, nur Computer und Roboter! Schlimmstenfalls könnten völlig unerwartet Lastwagen mit Containern am Eingangstor erscheinen, deren Fahrer auf schnellste Abfertigung drängen.

Duecks Algorithmus geht von einer Analogie aus, die den zweiten Erzählstrang des Buchs ausmacht. Wie verhal-

Die optimale Lösung des Sintflutproblems: trocken bleiben!

ten sich Menschen, die durch eine Sintflut bedroht werden? Eine sehr langsame Sintflut allerdings; das Wasser steigt unmerklich an, sodass die Menschen Zeit haben, sich zu retten. Auch hier sucht man ein Optimum, nämlich einen hohen Platz, auf dem man für einige Zeit von der Flut unbehelligt leben kann. Mit dieser Situation müssen sich die Bewohner eines nebligen Planeten (der keinen globalen Überblick zulässt) auseinander setzen – und erscheinen einem dabei vertraut und doch wieder unwirklich. Würden echte Menschen angesichts einer solchen Bedrohung über Grundstückspreise und der Gründung von Aktiengesellschaften nachdenken? Wahrscheinlich schon; man denke an die Reaktionen vieler an sich vernünftiger Menschen auf die sich abzeichnende Klimakatastrophe!

Diese Rahmengeschichte liest sich gut und macht nachdenklich. Was mir weniger gefällt, ist die Einteilung der Menschheit in »Typen«, die Dueck auch in seinen anderen Büchern vornimmt; hier sind es etwa »Hügelstürmer« oder »Individual-Lemminge«. Der einführende Abschnitt trägt ausgerechnet die Überschrift »Die Menschen sind verschieden«. Richtig! Ich würde sogar sagen: so verschieden, dass sie sich nur mit einiger Mühe und Gewalt in neun Klassen einfügen lassen. Auch die Technologiegläubigkeit des Autors ist nicht jedermanns Sache: »Die Menschheit geht ihren Weg, und es wird neue Technologiestufen geben auf dem Weg der Menschheit nach oben« (Seite 222); geht es wirklich »nach oben«? ▷

▷ Interessant das Literaturverzeichnis: sechsmal Dueck, dann die Arbeit von Scott Kirkpatrick und anderen, die ein dem Sintflutalgorithmus ähnliches Optimierungsverfahren (*simulated annealing* oder »simuliertes Ausglühen«) vorgeschlagen haben. Es folgen Lao Tse, Lichtenberg und schließlich zweimal Don Richard Riso, der die neun Typen der Persönlichkeit propagiert.

Wie fügt sich Lao Tse, der Philosoph des Nichthandelns, in das Dueck'sche Universum ein? »Die Tüchtigen nicht bevorzugen, so macht man, dass das Volk nicht streitet.« Oder: »Herrscht ein ganz Großer, so weiß das Volk kaum, dass er da ist.« Oder: »Darum spricht ein Berufener: Wenn wir nichts machen, so wandelt sich von selbst das Volk.« Der auf kurzfristigen Erfolg ausgerichtete Aktionismus der handelnden »Typen« kontrastiert auffallend mit den Mahnungen des alten Lehrers zur weisen Zurückhaltung. Nach der Legende verschwand Lao Tse im Alter von siebzig Jahren im Gebirge auf dem Weg in ein anderes Land. Im Buch von Dueck taucht der Weise zum Schluss am Rande des Ozeans auf.

Die Mathematiker, Manager, Firmengründer, Erfinder und Professoren, die im Buch auftreten, sind Karikaturen, überzeichnet, mit Wahrheitsgehalt ohne Zweifel, aber Karikaturen. Die ansprechenden Illustrationen von Stefan Budian haben mich ebenso begeistert wie den Autor. Dueck beschreibt auch nur einen Raum in dem riesigen Schloss der Mathematik, und über dessen Bedeutung kann man durchaus streiten. Wirklich dankbar bin ich dem Autor für Formulierungen wie diese: »Die Mathematik zieht in jede Ritze hinein und verbessert das gigantische System um ein paar Prozentpunkte« (Seite 223). Mathematik ist nicht nur nützlich, sie ist unentbehrlich!

Was mich ein wenig frustrierte: Fehlerhafte Trennungen sind bis in den gedruckten Text stehen geblieben, ebenso wie zahlreiche Überbleibsel aus der Umformulierung. Manche der »technischen« Zeichnungen sind aus ästhetischen Gründen bewusst unscharf verfremdet oder zu klein geraten, was nicht unbedingt sachdienlich ist. Da lobe ich mir die klaren Zeichnungen aus dem zitierten Artikel in Spektrum der Wissenschaft.

Ulrich Eckhardt

Der Rezensent ist Professor für Mathematik an der Universität Hamburg.

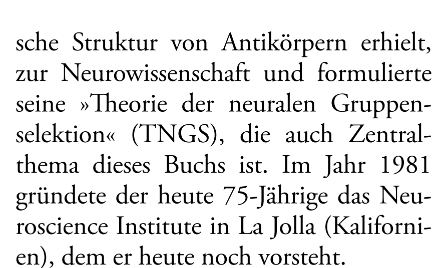


NEUROPHYSIOLOGIE

Gerald M. Edelman

Das Licht des Geistes

Wie Bewusstsein entsteht



Aus dem Amerikanischen von Christoph Trunk.
Patmos/Walter, Düsseldorf 2004. 187 Seiten, € 24,90

Der Gedanke »Ich bin mir meiner bewusst« klingt selbstverständlich – und zählt doch zum Kompliziertesten, das unser Kopf hervorzubringen vermag. Das menschliche Bewusstsein gehört zu den größten Herausforderungen der Neurowissenschaft, die zwar Sinnesreize messen und bestimmten Gehirnarealen zuordnen kann; wie aber aus einem einfachen Stimulus – Licht einer bestimmten Wellenlänge – die Farbempfindung »scheußliches Rot« werden kann und warum wir sie als solche empfinden, bleibt ein tiefes Rätsel.

Gerald M. Edelman wagt sich in dem vorliegenden Buch trotzdem an einen Erklärungsversuch. Der Mediziner und Immunologe wechselte nach seinem Nobelpreis 1972, den er für die chemische Struktur von Antikörpern erhielt, zur Neurowissenschaft und formulierte seine »Theorie der neuralen Gruppenselektion« (TNGS), die auch Zentralthema dieses Buchs ist. Im Jahr 1981 gründete der heute 75-Jährige das Neuroscience Institute in La Jolla (Kalifornien), dem er heute noch vorsteht.

In Übereinstimmung mit dem herrschenden Paradigma postuliert der Autor, dass die Strukturen in unserem Gehirn, die Bewusstsein erzeugen, in der individuellen Entwicklung durch eine Art Selbstorganisationsprozess aus unstrukturiertem Rohmaterial heranwachsen – eben durch die neurale Gruppenselektion. Die Nervenzellen im Kortex sind in Gruppen organisiert, die ihrerseits durch individuelle Netzwerke mit-

einander kommunizieren. Fortwährend werden Verbindungen geschaffen oder unterbrochen. Nur die meistgebrauchten Verbindungen bleiben auf die Dauer bestehen, so wie in der natürlichen Selektion nur die bestangepassten Individuen überleben – daher der Spitzname »Neuraler Darwinismus« für die TNGS.

Im Laufe dieser synaptischen Veränderungen bilden sich zahlreiche Verbindungen heraus, durch die einzelne Hirnareale in beiden Richtungen miteinander kommunizieren. Durch diesen »Reentry-Prozess« werden die eingehenden Signale synchronisiert – Interaktionen, die nach Meinung des Autors schließlich zu höheren Bewusstseinszuständen führen.

In den zwölf Kapiteln seines Buchs wendet Edelman seine TNGS auf alles an, was die moderne Philosophie zu Bewusstseinsprozessen zu sagen hat: die Aufmerksamkeit, das Selbstbewusstsein oder die Erlebnisqualität des Bewusstseins, die unter dem Schlagwort »Qualia« diskutiert wird. Bewusstsein ohne materielle Existenz ist nicht möglich: Es gibt keine »Geister« ohne Körper. Zombies (Körper ohne Geist) gibt es auch nicht: Wer sich wie ein mit Bewusstsein ausgestatteter Mensch verhält, muss Bewusstsein haben.

An diesen Stellen verliert sich Edelman so sehr in seiner philosophischen Betrachtungsweise, dass der eigentlich interessante Teil des Buchs die Selbstdisziplin des Lesers bis aufs Äußerste strapaziert. Man wird das Gefühl nicht los, dass das alles auch einfacher gehen müsste. Die Fülle an Informationen ist sehr gewöhnungsbedürftig, und die Anhäufung von Fachbegriffen, die für die wissenschaftliche Arbeit geboten sein mag, wirkt hier allzu abschreckend. Edelman scheint sein gesamtes neurophilosophisches Fachwissen unbedingt in ein Buch packen zu wollen – der Spagat zwischen wissenschaftlicher Präzision und allgemeiner Verständlichkeit gelingt ihm einfach nicht. In diesen Momenten wünscht man sich als Leser jene Erleuchtung, die einem das Cover verspricht.

Wer also Edelmans »bahnbrechende Theorie zur Entstehung, den Mechanismen und Merkmalen von Bewusstsein« (Umschlagtext) verstehen will, sollte reichlich Geduld und Selbstvertrauen mitbringen.

Kerstin Beckert

Die Rezensentin ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Stuttgart.

PREISRÄTSEL

Zahlen gesucht!

Von Roland Mildner

Gesucht sind alle vierstelligen Zahlen mit folgenden Eigenschaften: Die zweite Ziffer ist gleich der Summe aus der ersten und der vierten Ziffer. Das Quadrat der dritten Ziffer ist gleich der Summe aus der zweiten Ziffer und dem Fünffachen der vierten Ziffer. Die vierte Ziffer ist gleich der Summe aus der ersten und der dritten Ziffer.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir einen Experimentierkasten »Kachelmann Wetterstation«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. März 2005, eingehen.

Lösung zu »Das Kuckucksei« (Januar 2005)

Das Stabei kann jede Länge zwischen 0 und $2+\sqrt{3}$ annehmen.

Die Mathematik-AG am Hebel-Gymnasium Schwetzingen zeigte, dass

- das Gelege aus je zwei Dreiecken, Vierecken und Fünfecken besteht;
- beide Fünfecke eine gemeinsame Kante haben;
- beide Fünfecke kongruent und symmetrisch sind.

Bestehen die Fünfecke aus lauter Originaleiern, so ergibt sich eine ganze Schar von Gelegen (Beispiele siehe unten). Damit die Begrenzungsvier- und -fünfecke eben sind, muss das (schwarze) Kuckucksei parallel zu den beiden im Bild hinteren Eiern der Dreiecke liegen. Im linken Gelege ist das Kuckucksei kurz bis hin zum Grenzfall 0, im rechten lang bis zur Länge 2, bei der die Fünfecke zu Dreiecken entarten. Das Gelege in der Mitte mit regelmäßigen Fünfecken benötigt ein Kuckucksei der Länge $(1+\sqrt{5})/2$.

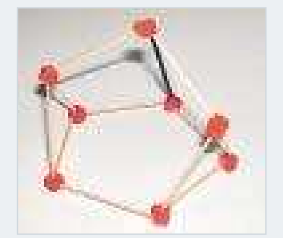
Alfred Schmidpeter verwies darauf, dass die beiden isomeren pentazyklischen Kohlenwasserstoffe Cuban und Cunean genau die gleiche Struktur haben. Beim Cunean sind allerdings alle Kanten etwa gleich lang und damit die fünfgliedrigen Ringe nicht planar.

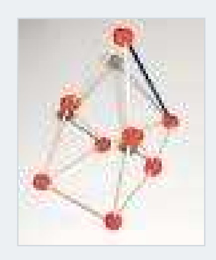


Eine andere Gelegeschar entsteht, wenn das Kuckucksei die gemeinsame Kante beider Fünfecke ist (oben). Dann sind beide Vierecke Quadrate, liegen in einer Ebene, und die beiden Dreiecke sind um einen beliebigen, für beide gleichen Winkel gegen die Ebene der Vierecke gedreht. Das Kuckucksei hat jede beliebige Länge zwischen $2-\sqrt{3}$ (beide Dreiecke ganz nach innen geklappt) und $2+\sqrt{3}$ (ganz nach außen).

Die Gewinner der drei Holzbausätze »Riesenrad« sind Bernd Rümmler, Göttingen; Angela Johansson, Mantorp (Schweden); und Helmut Mertes, Dortmund.







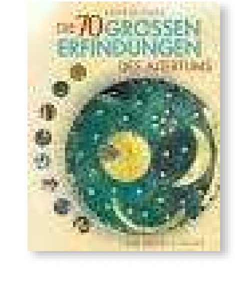
Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

TECHNIK

Brian M. Fagan

Die 70 großen Erfindungen des Altertums

Aus dem Englischen von Walter Spiegl.
Frederking und Thaler, München 2004. 304 Seiten, € 29,90



Wenn es darum geht, sein Leben angenehmer, abwechslungsreicher oder auch gesünder zu gestalten, dann kennt der Einfallsreichtum des Menschen keine Grenzen. Klimaanlagen und schnelle Autos, Computerspiele und ausgefallene Sportarten oder auch die rasante Entwicklung immer neuer Medikamente in der Medizin stehen heute am Ende einer langen Geschichte des menschlichen Erfindungsgeistes. Ausgefallene Fortbewegungsmittel, reißfeste High-Tech-Sportseile oder Arzneien gegen Krebs sind keine Zufallsprodukte, sondern können auf die Tradition eines langen Entwicklungs- und Verbesserungsprozesses verweisen.

Die Anfänge dieser Geschichte schildert Brian M. Fagan, Archäologe und emeritierter Professor für Anthropologie an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara, im vorliegenden Buch. Was den jüngsten Höhenflügen der Fantasie zu Grunde liegt, sind wegweisende Errungenschaften vor vielen tausend Jahren, die das Leben der Menschen jeweils revolutionär veränderten. Erfinder und Entdecker nutzten dann die Entwicklungen ihrer Vorgänger, um mit eigenen Ideen ein Produkt zu verbessern.

Zu den elementarsten unter den frühen Erfindungen zählt wohl der Pflug. Sein Vorgänger, der einfache hakenförmige Grabstock, ist wohl das archetypischste Werkzeug des Menschen schlechthin. Er trat bald, nachdem man überhaupt angefangen hatte, Pflanzen zu kultivieren, in Erscheinung. Die ältesten Spuren dieser landwirtschaftlichen Technik lassen sich bis ins 4. Jahrtausend v. Chr. zurückführen. In Mesopotamien fand man Piktogramme, die darauf schließen lassen, dass im Zweistromland schon Pflüge zum Ackerbau verwendet wurden. Sein unmittelbarer Nachfolger, der Hakenpflug, schuf die Voraussetzung für größere Ernten.

Ein weiterer Meilenstein in unserer Geschichte ist die Entwicklung des Papiers. Sie wird dem chinesischen Hofbeamten Tsai Lun zugeschrieben. Einem zeitgenössischen Lexikon zufolge soll er 105 n. Chr. »eine Matte aus Faserabfällen« aus Baumrinden, Hanfrückständen, Lumpen und ausgemusterten Fischnetzen hergestellt haben. Archäologische Befunde aus Südostchina lassen jedoch vermuten, dass schon drei Jahrhunderte früher mit Hanf und Leinen zur Papierherstellung experimentiert wurde. Erst im 11. Jahrhundert gelangte das Papier über die Seidenstraße auch nach Europa.

Fagan beleuchtet in seinem Buch alle Aspekte des Erfindergeistes von der Ernährung über Fortbewegungsmittel bis hin zur Kriegstechnik, Medizin und Freizeitbeschäftigung. Unterhaltsam sind seine Ausführungen über den Sport. Erste Hinweise über Wettkämpfe stammen ebenfalls aus Mesopotamien. Es sind einige wenige Bilder von Ringern und Boxern sowie kurze Erläuterungen zu den Regeln auf Keilschrifttafeln aus dem frühen 3. vorchristlichen Jahrtausend. Sportlich betätigt haben sich die Menschen auf allen Kontinenten. So gibt es aus etwa derselben Zeit auch aus Indien Überlieferungen von Stierwettkämpfen und akrobatischen Darbietungen.

Jeder einzelnen der siebzig Erfindungen ist ein separates Kapitel gewidmet. Dazu kommt eine ansprechende und ausführliche Bebilderung. Zahlreiche Buchtipps verweisen auf weiterführende, allerdings mehrheitlich englische Literatur. Eine gut bebilderte Zeittafel gibt einen schnellen Überblick über die bedeutendsten Entwicklungen der Menschheit im Zeitraum von vor zwei Millionen Jahren bis etwa 1200 v. Chr.

Thorsten Naeser

Der Rezensent ist Diplomgeograf und Wissenschaftsjournalist in München.

Die öffentlichen Latrinen der Römer wie diese Bedürfnisanstalt in Ostia boten Dutzenden von Menschen gleichzeitig Platz.



Der Gedanke »Ich bin mir meiner bewusst« klingt selbstverständlich – und zählt doch zum Kompliziertesten, das unser Kopf hervorzubringen vermag. Das menschliche Bewusstsein gehört zu den größten Herausforderungen der Neurowissenschaft, die zwar Sinnesreize messen und bestimmten Gehirnarealen zuordnen kann; wie aber aus einem einfachen Stimulus – Licht einer bestimmten Wellenlänge – die Farbempfindung »scheußliches Rot« werden kann und warum wir sie als solche empfinden, bleibt ein tiefes Rätsel.

Gerald M. Edelman wagt sich in dem vorliegenden Buch trotzdem an einen Erklärungsversuch. Der Mediziner und Immunologe wechselte nach seinem Nobelpreis 1972, den er für die chemische Struktur von Antikörpern erhielt, zur Neurowissenschaft und formulierte seine »Theorie der neuralen Gruppenselektion« (TNGS), die auch Zentralthema dieses Buchs ist. Im Jahr 1981 gründete der heute 75-Jährige das Neuroscience Institute in La Jolla (Kalifornien), dem er heute noch vorsteht.

In Übereinstimmung mit dem herrschenden Paradigma postuliert der Autor, dass die Strukturen in unserem Gehirn, die Bewusstsein erzeugen, in der individuellen Entwicklung durch eine Art Selbstorganisationsprozess aus unstrukturiertem Rohmaterial heranwachsen – eben durch die neurale Gruppenselektion. Die Nervenzellen im Kortex sind in Gruppen organisiert, die ihrerseits durch individuelle Netzwerke miteinander kommunizieren. Fortwährend werden Verbindungen geschaffen oder unterbrochen. Nur die meistgebrauchten Verbindungen bleiben auf die Dauer bestehen, so wie in der natürlichen Selektion nur die bestangepassten Individuen überleben – daher der Spitzname »Neuraler Darwinismus« für die TNGS.

Im Laufe dieser synaptischen Veränderungen bilden sich zahlreiche Verbindungen heraus, durch die einzelne Hirnareale in beiden Richtungen miteinander kommunizieren. Durch diesen »Reentry-Prozess« werden die eingehenden Signale synchronisiert – Interaktionen, die nach Meinung des Autors schließlich zu höheren Bewusstseinszuständen führen.

In den zwölf Kapiteln seines Buchs wendet Edelman seine TNGS auf alles an, was die moderne Philosophie zu Bewusstseinsprozessen zu sagen hat: die Aufmerksamkeit, das Selbstbewusstsein

PREISRÄTSEL

Zahlen gesucht!

Von Roland Mildner

Gesucht sind alle vierstelligen Zahlen mit folgenden Eigenschaften: Die zweite Ziffer ist gleich der Summe aus der ersten und der vierten Ziffer. Das Quadrat der dritten Ziffer ist gleich der Summe aus der zweiten Ziffer und dem Fünffachen der vierten Ziffer. Die vierte Ziffer ist gleich der Summe aus der ersten und der dritten Ziffer.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir einen Experimentierkasten »Kachelmann Wetterstation«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. März 2005, eingehen.

Lösung zu »Das Kuckucksei« (Januar 2005)

Das Stabei kann jede Länge zwischen 0 und $2+\sqrt{3}$ annehmen.

Die Mathematik-AG am Hebel-Gymnasium Schwetzingen zeigte, dass

- das Gelege aus je zwei Dreiecken, Vierecken und Fünfecken besteht;
- beide Fünfecke eine gemeinsame Kante haben;
- beide Fünfecke kongruent und symmetrisch sind.

Bestehen die Fünfecke aus lauter Originaleiern, so ergibt sich eine ganze Schar von Gelegen (Beispiele siehe unten). Damit die Begrenzungsvier- und -fünfecke eben sind, muss das (schwarze) Kuckucksei parallel zu den beiden im Bild hinteren Eiern der Dreiecke liegen. Im linken Gelege ist das Kuckucksei kurz bis hin zum Grenzfall 0, im rechten lang bis zur Länge 2, bei der die Fünfecke zu Dreiecken entarten. Das Gelege in der Mitte mit regelmäßigen Fünfecken benötigt ein Kuckucksei der Länge $(1+\sqrt{5})/2$.

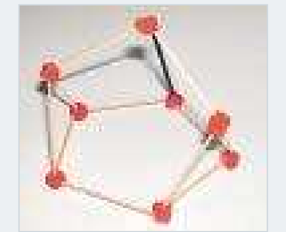
Alfred Schmidpeter verwies darauf, dass die beiden isomeren pentazyklischen Kohlenwasserstoffe Cuban und Cunean genau die gleiche Struktur haben. Beim Cunean sind allerdings alle Kanten etwa gleich lang und damit die fünfgliedrigen Ringe nicht planar.

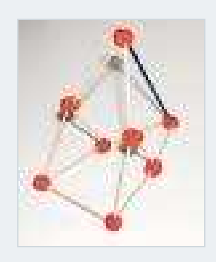


Eine andere Gelegeschar entsteht, wenn das Kuckucksei die gemeinsame Kante beider Fünfecke ist (oben). Dann sind beide Vierecke Quadrate, liegen in einer Ebene, und die beiden Dreiecke sind um einen beliebigen, für beide gleichen Winkel gegen die Ebene der Vierecke gedreht. Das Kuckucksei hat jede beliebige Länge zwischen $2-\sqrt{3}$ (beide Dreiecke ganz nach innen geklappt) und $2+\sqrt{3}$ (ganz nach außen).

Die Gewinner der drei Holzbausätze »Riesenrad« sind Bernd Rümmler, Göttingen; Angela Johansson, Mantorp (Schweden); und Helmut Mertes, Dortmund.







Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

Ein Stoß gibt den anderen

Kann man einen Ball so heftig auf den Boden schleudern, dass er zum Mond fliegt? Nicht ganz; aber mit 252 Bällen, deren größter reichlich 30 Tonnen wiegt, könnte das Kunststück gelingen – zumindest theoretisch.

Von Norbert Treitz

Ein kleiner Ball, der dicht über einem großen und gemeinsam mit diesem zu Boden fällt, ist gut für eine kleine Überraschung: Auf dem Rückweg vom Boden stößt der große Ball den kleinen und gibt ihm dabei im günstigsten Fall fast seine ganze Bewegungsenergie mit, wodurch der kleine einen bemerkenswerten Luftsprung macht. Das haben wir in einer früheren Folge beschrieben (SdW 8/2004, S. 101).

Was geschieht, wenn man einen Turm aus drei, vier … Bällen mit geeignet gewählten Massenverhältnissen fallen lässt? Springt der oberste, kleinste Ball dann noch viel höher? Und wie rechnet man das aus?

Nach dem Motto »Mathematik ist das Vermeiden von Rechnen« wählt man sich zunächst ein Bezugssystem, das möglichst wenig Rechnen erfordert. Das ist in aller Regel das Schwerpunktsystem, das heißt dasjenige, in dem der Schwerpunkt der beiden elastisch miteinander wechselwirkenden Punktmassen ruht. Denn ein zentraler Satz der Stoßtheorie besagt, dass in diesem System jeder der beiden Partner nach dem Kontakt (das heißt nach der Impulsübergabe) die gleiche Bewegungsenergie hat wie vorher.

In anderen Inertialsystemen (unbeschleunigten Bezugssystemen) ist lediglich die Summe der Bewegungsenergien vorher und nachher gleich, was das Kriterium des elastischen Stoßes ist. Ob es dabei zu einer Übergabe von Bewegungsenergie zwischen den Stoßpartnern kommt und welcher dabei der gebende und welcher der nehmende ist, hängt vom betrachteten Bezugssystem ab.

Insbesondere wird im Schwerpunktsystem (wohlgemerkt in dem der jeweils unmittelbar beteiligten zwei Stoßpartner) keine Bewegungsenergie übertragen, und daher bekommt jede der beiden Punktmassen auch wieder ihren alten Geschwindigkeitsbetrag (Kasten links). Die Richtungen können dabei von geometrischen Details (bei Kugeln vom »Stoßparameter« und allgemein auch von den Formen der Objekte) abhängen: Diese Feinheiten machen den Unterschied zwischen schlechten und guten Billardspielern aus.

Dass die Summe der Bewegungsenergien vorher und nachher die gleiche ist, folgt übrigens nicht aus dem Energieerhaltungssatz; denn der besagt nur, dass die Summe aller Energien unverändert bleibt. Es gibt kein Naturgesetz, nach dem (äußere) Bewegungsenergie erhalten bleiben müsste. Die Erfahrungswelt zeigt pausenlos Gegenbeispiele. So verhalten sich andere Objekte als Kugeln – Stangen zum Beispiel – beim Stoß völlig anders als elastisch.

Während eines Stoßes wird Bewegungsenergie in Deformation der beteiligten Körper umgesetzt und kann dadurch im Extremfall vorübergehend auf null absinken. Beim Swing-by-Manöver,

Impuls- und Energietransfer – grafisch dargestellt

Die Energieübergabe bei einer elastischen Wechselwirkung zwischen zwei Punktmassen ist gleich dem Skalarprodukt aus der Impulsübergabe und der Geschwindigkeit des gemeinsamen Schwerpunkts im verwendeten (»Labor«-)System. Insbesondere ist sie gleich null, wenn im Laborsystem der Schwerpunkt ruht.

Das wird geometrisch bewiesen durch die Zeichnung, welche die Situation im Geschwindigkeitsraum zeigt: *L* bezeichnet die Geschwindigkeit des Laborsystems, *S* die des gemeinsamen Schwerpunkts beider Massen. Der Vektor $\overrightarrow{LS}$ ist also die Geschwindigkeit des Schwerpunkts, gemessen im Laborsystem. Entsprechendes gilt für die Geschwindigkeit einer der beiden Punktmassen vor (*V*) und nach (*N*) dem Kontakt. Der Vektor $\overrightarrow{VN} = \vec{v}$ ist die Differenz der Geschwindigkeiten, $m\,\overrightarrow{VN}$ die Impulsübergabe $\vec{p}$. Deren Skalarprodukt mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_0 = \overrightarrow{LS}$ ist gleich dem Produkt aus $\vec{p}$ und der Komponente $\vec{u}$ von $\overrightarrow{LS}$ in Richtung von $\vec{p}$. Das ist wiederum bis auf den Faktor *m* gleich dem Flächeninhalt des gelben oder des roten Trapezes.

Andererseits ist die Bewegungsenergie »nachher« bis auf den Faktor *m*/2 gleich $\overrightarrow{LN}^2$, das ist die Summe aller farbigen Flächen, und »vorher« gleich $\overrightarrow{LV}^2$, das ist die Summe aller blauen Flächen (Pythagoras).

Für den anderen Partner sieht die Zeichnung im Prinzip genauso aus; nur die Pfeile $\overrightarrow{SV}$ und $\overrightarrow{SN}$ zeigen in die entgegengesetzte Richtung und sind im Verhältnis der Massen länger (kürzer), wenn der zweite Partner die kleinere (größere) Masse hat. Die Formel gilt also auch für ungleiche Massen.

$$\vec{p}\cdot\vec{v}_0 = m\,\overrightarrow{VN}\cdot\overrightarrow{LS} = (m/2)\,(\overrightarrow{LN}^2 - \overrightarrow{LV}^2)$$

ALLE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ


ELKE REINECKE


Newtons Wiege – oder Stoßfolgen für Einsteiger

bei dem sich eine Raumsonde durch dichten Vorbeiflug Schwung bei einem Planeten holt, wird die Summe der Bewegungsenergien zwischendurch sogar größer, weil die bewegten Körper sich Energie aus dem Gravitationsfeld leihen.

Newtons Wiege: Auf vielen Schreibtischen – nicht nur von Physikern – findet sich ein Gerät, das je nach Fakultät als »Newton's Cradle« oder als Managerspiel (zur Beruhigung?) bezeichnet wird: n gleiche Kugeln sind einzeln an jeweils zwei Fäden (bifilar) in einer waagerechten Reihe aufgehängt, sodass sie sich paarweise knapp berühren. Lenkt man m von ihnen gemeinsam nach außen aus – am einfachsten durch Anfassen der m-ten Kugel – und lässt sie los, so schlagen am anderen Ende stets m Kugeln gleich weit aus, auch wenn man vielleicht erwarten würde, dass an dem Ende eine Kugel alles alleine bekommt.

Die landläufige Erklärung besteht in den Schlagwörtern »Energie- und Impulssatz«, was zumindest missverständlich ist (siehe oben). Man muss voraussetzen, dass alle Stöße ziemlich genau elastisch sind und man alle Begegnungen zumindest theoretisch in Stöße mit nur zwei Beteiligten zerlegen kann. Diese Stöße finden immer dann statt, wenn zwei benachbarte Kugeln Kontakt und aufeinander zu gerichtete Relativgeschwindigkeiten haben.

Nummerieren wir die Kugeln von links nach rechts mit 1 bis n. Haben wir die ersten m Kugeln nach links ausgelenkt und kommen sie gerade zurück, so trifft zunächst Kugel m auf Kugel $m+1$ und gibt ihr sofort ihren ganzen Impuls und ihre ganze Bewegungsenergie (jeweils im Laborsystem gemessen), bleibt daraufhin also stehen. Während Kugel $m+2$ noch ruht, wandern Impuls und Energie mit Schallgeschwindigkeit durch Kugel $m+1$, bevor die Kugeln sich mehr bewegt haben als um ihre gegenseitigen Eindringtiefen. Das Bild unten zeigt den weiteren Verlauf.

Jakobsleiter: Kann man durch fortgesetzte Stoßprozesse, mit einem Turm aus lauter Bällen, eine Masse (den obersten Ball) bis zum Mond schießen? Um diese Frage zu beantworten, denken wir zunächst über den erforderlichen Energieaufwand nach.

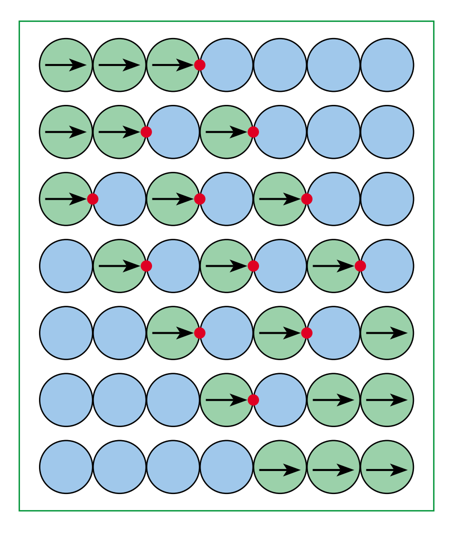
Kann ein Bergsteiger mit einer geeigneten Himmelsleiter (vergleiche Jakobs Traum im 23. Kapitel der Genesis) aus dem Schwerefeld der Erde aussteigen? Im Prinzip ja. Denn die Anziehungskraft der Erde lässt mit zunehmender Entfernung nach. Wenn die Himmelsleiter so gebaut ist, dass der Weg von einer Sprosse zur nächsten immer gleich viel Arbeit erfordert, dann liegen ihre Sprossen umso weiter auseinander, je höher man kommt – und es sind nur endlich viele Sprossen! Von der letzten stößt man sich ab und fliegt davon.

Ersatzweise stelle man sich vor, die Anziehungskraft der Erde lasse nicht nach. Dann hätte unser Himmelsstürmer – auf einer Leiter mit konstantem Sprossenabstand – dieselbe Arbeit bereits dann geleistet, wenn er vom Erdboden bis zum doppelten Erdradius gestiegen wäre, also ungefähr 6370 Kilometer (Kasten S. 116).

Damit ist das Schwerefeld der Sonne zwar noch nicht überwunden, aber für eine Reise zum Mond würde das reichen: Wer 6370-mal einen 1000 Meter hohen Berg besteigen kann, kann auch mit geeigneter Leiter bei laufender Versorgung mit Nahrung und Sauerstoff zum Mond klettern. Wer tausend Meter Höhenunterschied pro Tag schafft, kommt bei freiem Wochenende und 30 Tagen Jahresurlaub in knapp 28 Jahren zum Ziel.

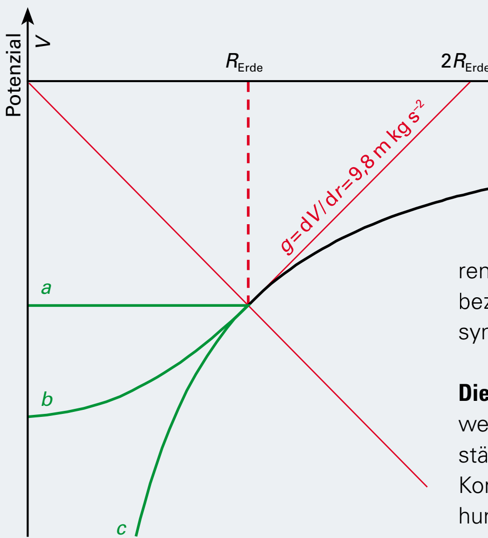
Leider kann unser Wanderer die erforderliche Nahrung weder vorher essen noch im Rucksack mitnehmen, weil sie viel schwerer ist als er selbst, und um sie mitzuschleppen, benötigte er entsprechend noch viel mehr. Selbst wenn er zu 50 Prozent aus Nahrung bestünde, wäre diese schon bei geringerer Höhe aufgebraucht. Dass Raketen mit chemischen Treibstoffen überhaupt zum Mond kommen, liegt an dem krassen (Miss-)Verhältnis aus Startmasse und Nutzlast, was technisch durch das Abwerfen der größeren Stufen realisiert wird. Das betrachten wir etwas genauer:

Das Verlassen der Erde vom Boden ins Unendliche für eine Masse m erfordert $m\,g\,R_{\text{Erde}} = m \cdot 6{,}3 \cdot 10^7$ Joule pro Ki- ▷



Wenn in Newtons Wiege drei von sieben Kugeln auf die übrigen losgelassen werden, haben zu verschiedenen Zeitpunkten verschiedene Paare von Kugeln Kontakt (rote Markierungen). Blau gezeichnete Kugeln ruhen, grüne haben einen Impuls nach rechts (Pfeile). Zur Vereinfachung ist angenommen, dass mehrere Kontakte an verschiedenen Stellen gleichzeitig stattfinden.

Himmelsleiter – die kurze Version



In der schwarzen Kurve ist das Potenzial (Gravitationsenergie dividiert durch die zu transportierende Masse) gegen den Abstand vom Mittelpunkt der Erde aufgetragen. Das ist im Außenraum ein Stück einer rechtwinkligen Hyperbel, denn das Integral über eine Kraft, die proportional zu $1/r^2$ ist, muss proportional zu $1/r$ sein.

Wir sind frei, die Maßstäbe für die Koordinatenachsen zu wählen, und nutzen diese Freiheit so, dass die Hyperbel für $r = R_{Erde}$ (Erdoberfläche) die Winkelhalbierende des Achsenkreuzes schneidet und bezüglich dieser Winkelhalbierenden symmetrisch ist.

Die Steigung der Hyperbel zeigt die am jeweiligen Ort vorhandene Schwere-Feldstärke (also Fallbeschleunigung ohne Korrekturen durch Auftrieb und Erddrehung) an. Bei unserer speziellen Skalenwahl hat die (rote) Tangente bei $r = R_{Erde}$ die Steigung 1 und schneidet daher die r-Achse beim doppelten Erdradius. Wer also gegen das Schwerefeld der Erde am Boden 6370 Kilometer (einen Erdradius) Höhenunterschied überwindet, wendet genug Energie auf, um dem Schwerefeld der Erde zu entkommen.

Im Inneren der Erde ist die Potenzialkurve eine der drei grünen Kurven, je nachdem, ob die Masse der Erde auf der Oberfläche der (Hohl-)Kugel verteilt ist *(a)*, homogen die ganze Kugel füllt (*b*, fast realistisch) oder im Mittelpunkt der Erde konzentriert ist *(c)*.

▷ logramm. Das ist äquivalent zu $0{,}7 \cdot 10^{-9}$ mal der Masse nach einer Formel, die Albert Einstein vor 100 Jahren mitgeteilt hat. Für die Flucht von der Erde würde es also genügen, ein knappes Milliardstel der eigenen Masse in Bewegungsenergie umzusetzen – was mangels verfügbarer Antimaterie nicht ohne Weiteres möglich ist.

Die Energiegewinnung durch Oxidieren von optimalen Brennstoffen wie Fett (im Menschen) oder Kohlenwasserstoffen (in der Rakete) liefert pro Kilogramm Fett rund 35 Megajoule. Wenn man den erforderlichen Sauerstoff mitrechnet, sind es noch 8 Megajoule pro Kilogramm, entsprechend $0{,}7 \cdot 10^{-10}$ mal der Masse von Brenn- und Sauerstoff. So gesehen spielt sich die erdnahe Raumfahrt in der neunten Stelle hinter dem Komma ab, Chemie aber in der zehnten. Raumfahrt mit chemischen Energieträgern ist also nur möglich, wenn man den größten Teil von ihnen und ihren Produkten in Bodennähe behält.

Ein Kilogramm 6370 Kilometer hoch zu heben ist zwar sehr mühsam; aber der schiere Energiebedarf ist keineswegs astronomisch. Es ist derselbe, den eine mittelschwere Lokomotive (63 700 Kilogramm) benötigt, um einen Höhenunterschied von 100 Metern zu überwinden. Stellen wir uns einen Flaschenzug – natürlich mit gewichtslosen Seilen und Rollen – vor: Auf der einen Seite fallen 63 700 Kilogramm 100 Meter tief, und auf der anderen steigt ein Kilogramm in dem gedachten Ersatzfeld bis zum doppelten Erdradius. Für das richtige Feld müsste man die Übersetzung variabel gestalten (etwa mit schnecken- oder kegelförmigen Rollen, aber immer noch gewichtslos) und käme mit dem einen Kilogramm bis zum Mond, während sich die Lokomotive von der Talbrücke abseilt.

Mit der Ballpyramide zum Mond? Wenden wir nun unsere Ball-Experimente in Gedanken auf die Astronautik an.

Wenn man zwei Bälle mit dem Massenverhältnis 3:1 zugleich »huckepack« (der leichte genau auf dem schweren) fallen lässt, kommt dabei die ganze Bewegungsenergie dem leichten zu, sodass dieser die vierfache Starthöhe erreicht und der schwere ohne weitere Abklingprozesse am Boden liegen bleibt. Das haben wir im Augustheft gesehen.

Ein größeres Massenverhältnis als 3 : 1 hilft nicht wirklich. Selbst bei einem unendlichen Verhältnis der Ballmassen kommt nur die neunfache Höhe heraus, und das auch nur in dem Idealfall, der schon wegen der Unvollkommenheit der Elastizität nicht erreicht wird – die Endlichkeit der Massenverhältnisse stört da viel weniger. Dass dabei der schwere Ball fast genauso gut die Starthöhe wieder erreicht wie ohne den leichten, tröstet den wenig, der dem leichten Ball die Daumen drückt und eine weite Reise wünscht.

Wir wünschen uns daher eine Situation, in der wir eine große Masse aus einer maßvollen Höhe fallen lassen derart, dass der weitaus größte Teil davon sogleich liegen bleibt und ein ziemlich kleiner Teil dafür sehr hoch springt. Im homogenen Schwerefeld ist die Energiebilanz dazu sehr einfach: Die Höhen verhalten sich so wie die gesamte zuerst fallende zu der hinterher hochspringenden Masse. Aber wie bekommen wir die Masse dazu, ihre Energie gerade passend aufzuteilen? Wir werden sehen, dass wir die Masse trickreich in hinreichend viele Bälle aufteilen und diese exakt vertikal übereinander starten müssen. Nur der oberste springt hoch, während alle anderen sogleich und ohne Einfluss der Reibung am Boden bleiben. Kommt man damit höher als bis zur neunfachen Starthöhe oder gar unbegrenzt hoch?

Wir denken uns nun eine vertikale Folge von Bällen mit – von unten nach oben – in trickreicher Weise abnehmenden Massen in paarweisem losem Kontakt. Sie fallen alle gleichzeitig um eine Höhendifferenz, welche ihnen die gemeinsame Geschwindigkeit $-v$ gibt, unmittelbar bevor es zur Kaskade der Stöße kommt. Zuerst wird die unterste elastisch am Boden reflektiert und kommt mit $+v$ nach oben zurück. Nun sollen die Massen so abgestimmt sein, dass jeder aufsteigende Ball von seinem unmittel-

baren oberen Nachbarn auf einen Schlag zur Ruhe im Laborsystem gebracht wird. Alle von oben kommenden haben $-v$, die aufsteigenden aber sind schneller und haben $+nv$, mit einem noch unbekannten reellen Faktor n, der zudem von Ball zu Ball verschieden ist.

Wir betrachten nun einen Ball mit der Nummer i und seinen oberen Nachbarn mit $i+1$. Die Massen seien m_i und m_{i+1}, die Geschwindigkeiten im Laborsystem $+nv$ und $-v$. Ihr gemeinsamer Schwerpunkt hat dann die Geschwindigkeit $v_S = (m_i nv - m_{i+1} v)/(m_i + m_{i+1})$. Ball i hat in diesem Schwerpunktsystem die Geschwindigkeit $nv - v_S$ vor dem Stoß und das Negative davon nach diesem. Im Laborsystem hat er dann $2v_S - nv$. Wir wählen das Massenverhältnis nun so, dass diese Geschwindigkeit null wird, und finden $m_{i+1}/m_i = n/(n+2)$ als rekursive Bestimmung für alle Massenverhältnisse jeweils benachbarter Bälle.

Der obere der beiden Bälle kommt mit $-v$ im Laborsystem, also $-v - v_S$ im Schwerpunktsystem und steigt nach dem Stoß mit $v+v_S$ im Schwerpunktsystem und daher $v+2v_S$ im Laborsystem auf. Einsetzen liefert uns das schöne Ergebnis, dass jeder Ball mit v mehr aufsteigt, als es sein unterer Nachbar einen Stoß zuvor getan hat. Wenn wir dem untersten Ball, der den Planeten direkt berührt, die Nummer 1 geben, so hat der i-te Ball die i-fache Geschwindigkeit des ersten: $nv = iv$, bevor er mit seinem oberen Nachbarn enger kollidiert (sofern er noch einen hat).

Auf Grund der Energiebilanz muss man für die 63700-fache Höhe (von unseren 100 Metern) die 252-fache Geschwindigkeit erreichen, also ist die Zahl der Bälle $n_{max} = 252$, und der oberste und kleinste muss 1/63700 der Gesamtmasse haben.

Wie schwer aber mag der unterste sein? Dazu sehen wir uns die rekursive Massenbestimmung an. Normieren wir die Masse des untersten Balls auf 1, so finden wir für die Massen der Bälle die Folge

$$1, \frac{1}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{10}, \frac{1}{15}, \frac{1}{21}, \frac{1}{28}, \frac{1}{36}, \ldots$$

Um sie aufzuaddieren, schreiben wir sie etwas anders:

$$\frac{2}{1 \cdot 2} + \frac{2}{2 \cdot 3} + \frac{2}{3 \cdot 4} + \frac{2}{4 \cdot 5} + \ldots$$

Wegen

$$\frac{1}{n \cdot (n+1)} = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}$$

gilt

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 4} + \ldots + \frac{1}{n \cdot (n+1)}$$
$$= \left(1 - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4}\right)$$
$$+ \ldots + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right)$$
$$= 1 - \frac{1}{n+1}\,.$$

Die überraschend einfache Bestimmung von Grenzwert und Restglied dieser gar nicht so trivial aussehenden Reihe hat der junge Diplomat Freiherr von Leibniz gefunden, nachdem ihm sein Gastgeber Christiaan Huygens diese Nuss zu knacken gegeben hatte.

Für unseren Sprung zum Mond bedeutet das, dass bei 100 Meter Fallhöhe der unterste Ball etwas mehr als die Hälfte der gesamten Masse enthalten muss und damit das über 30000-Fache der Nutzlast.

Sie können nun leicht abschätzen, dass wir bei gleicher Fallhöhe rund 1000 Bälle brauchen, um nicht nur das Schwerefeld der Erde, sondern auch das Sonnensystem von der Erdbahn aus zu verlassen.

Unendlich hoch *n*: Wir hatten auch gesehen, dass bei einem unendlichen Massenverhältnis der beiden Bälle – wie wörtlich das auch immer gemeint sein mag – schon der zweite Ball die dreifache Geschwindigkeit und damit die neunfache Starthöhe erreicht, wenn alle Stöße wirklich vollkommen elastisch sind. Wie hoch kommt man, wenn man dieses Verfahren iteriert und eine Ballpyramide aus n Bällen fallen lässt, deren Massen sozusagen paarweise um den Faktor »unendlich« verschieden sind? Wir wissen vom leichten Ball und schweren Schläger oder vom Swing-by, dass im Laborsystem der extrem leichte Stoßpartner seinen Geschwindigkeitsbetrag um das Doppelte von dem des schweren erhöhen kann. Nun fallen alle Bälle mit dem gleichen $-v$ auf ihre jeweiligen unteren Nachbarn, aber diese kommen ihnen nach oben – außer dem untersten Ball – durchaus schneller entgegen. Der zweite Ball hat schon $+3v$, wie wir gesehen haben. Der dritte bekommt daher $(1 + 2 \cdot 3)v = 7v$, der vierte entsprechend $15v$, die Folge geht dann weiter mit $(2^n-1)v$. Um mit 100 Meter Starthöhe zum Mond zu kommen, genügen dann nach dieser wilden Abschätzung acht Bälle, denn 255 ist größer als 252, aber das Nutzlastverhältnis ist ausgesprochen bescheiden, nämlich die –9. Potenz des als unendlich angesetzten Massenverhältnisses. Das ist auch kein Wunder, denn die anderen sieben Bälle bleiben bei dieser Variante ja nicht (sofort) am Boden liegen, sondern hüpfen auf die einfache, neunfache, 49-fache, 224-fache … Starthöhe, was nun doch eine ziemliche Verschwendung ist.

Zur näherungsweisen Realisierung der Ballpyramiden werden die Bälle oft mit Bohrungen auf einen Spieß gesteckt, der am größten Ball festgemacht ist und die Justierung übernehmen soll. Leider übernimmt er auch beachtliche Reibung, und die Vorführung ist oft weniger eindrucksvoll als der ganz einfache Freihandversuch mit zwei Bällen und einem Planeten. ◁

Von der Pyramide aus 252 Bällen, die 100 Meter tief fallen, bleiben alle liegen bis auf den obersten, der bis zum Mond fliegt. Jeder zehnte Ball ist schwarz. Die Zeichnung ist maßstabsgetreu!

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Nüsse & Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch. Harri Deutsch, Frankfurt (Main), in Vorbereitung

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Physik. Von Christian Gerthsen und Helmut Vogel. Springer, Berlin 1997

Spiele mit Physik! Von Norbert Treitz. 4. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1996

Unendliche Reihen. Von Herbert Meschkowski. BI, Mannheim 1982

Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Von Albert Einstein in: Annalen der Physik, Bd. 18, S. 639, 1905

NATURGESETZE

Was ist heute real?

Anlässlich des Buchs »The Road to Reality – A Complete Guide to the Laws of the Universe« von Roger Penrose, macht sich der Teilchenphysiker Henning Genz Gedanken über die Natur der Naturgesetze und deren Realität.

Gasmoleküle bewegen sich durch Raum und Zeit wie Billardbälle. Bei tiefen Temperaturen jedoch dominieren Quanteneffekte – das klassische Raumzeitbild versagt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von Henning Genz

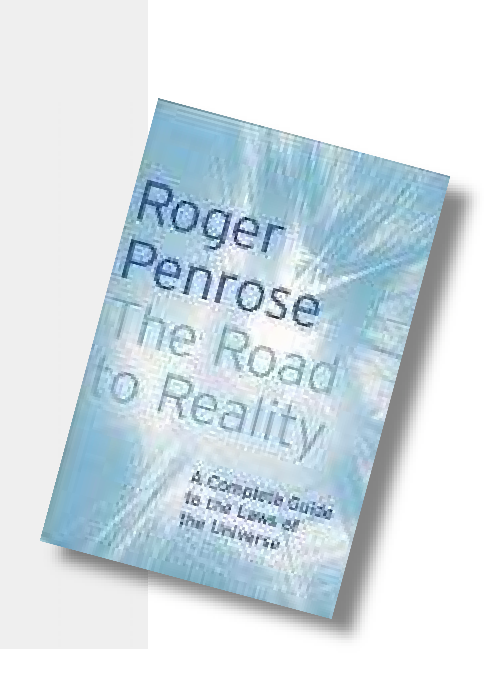
Dem Verständnis der Realität haben Generationen von Philosophen ihr Leben gewidmet, offensichtlich ohne zu einem Ergebnis gekommen zu sein. Physiker, die mit dem Begriff Realität konfrontiert werden, wollen ihn pragmatisch verstehen. Ihnen geht es nicht darum, was Realität letztlich sei, sondern darum, was wir meinen, wenn wir diesen Begriff verwenden.

Anlass dieses Essays ist das im Sommer 2004 erschienene 1094 Seiten lange Buch »The Road to Reality – A Complete Guide to the Laws of the Universe« von Roger Penrose. Der emeritierte Mathematikprofessor der Universität Oxford ist Gewinner zahlreicher Preise, darunter, zusammen mit Stephen Hawking, der renommierte Wolf-Preis für Physik 1988. Ich habe mit dem Buch gehadert, war von ihm fasziniert und fühle mich am Ende durch es bereichert. Bereichert durch Einblicke in die Denkweise von Roger Penrose, die zwar nicht meine ist, ihr aber nahe kommt. Verkürzt unterscheiden sich unsere Auffassungen vor allem dadurch, dass der Abgrund zwischen naiv verstehbarer und anderer Realität, den ich sehe, sich für den Oxforder Mathematiker nicht auftut. Die Naturgesetze halte ich wie er für real – Penrose in ihrer mathematischen »platonischen« Formulierung, ich in ihren Auswirkungen in der naiv verstandenen Realität der Physik.

Ich sollte klar machen, dass ich von einem Standpunkt aus schreibe. Nämlich von dem meines Buchs »Wie die Naturgesetze Wirklichkeit schaffen«. Darin behaupte ich, dass den Gesetzen der Physik eher als den Objekten, deren Existenz sie behaupten – ihrer Ontologie –, Realität zugesprochen werden kann. Die naive Realität von Billardbällen und Zeigerstellungen wird hierdurch nicht berührt, wohl aber die von Newtons absolutem Raum sowie die von Molekülen und Elektronen. Will man ihnen Realität zusprechen, setzt man sich zwei komplementären Einwänden aus. Erstens dem der so genannten Unterbestimmtheit: Wie konnte Newton von »dem« absoluten Raum sprechen, wenn doch seine Mechanik keine experimentelle Unterscheidung von Räumen erlaubt, die sich mit verschiedenen konstanten Geschwindigkeiten relativ zueinander bewegen? Mit der Konsequenz, dass nur durch willkürliche Ernennung einer von ihnen zu dem absoluten Raum der Newton'schen Mechanik erhoben werden kann. Verzichtet man auf dieses subjektive Element, kann Realität offenbar nur der Gemeinschaft aller Räume mit verschiedenen Relativgeschwindigkeiten zugesprochen werden.

Den zweiten Einwand will ich durch das Billardballmodell der Gase erläutern. Dieses unterstellt, dass sich Moleküle in Gasen wie Billardbälle verhalten, indem sie elastisch aneinander stoßen. Natürlich müssen wir von Eigenschaften realer Billardbälle wie ihren Farben absehen, wenn wir sie als Modelle für Moleküle verwenden wollen. Aber dadurch verlieren sie ihre Realität im Sinn der Physik nicht. Denn wir verwenden diesen Begriff so, dass er farblose Bälle einbeziehen kann. Nicht aber einbeziehen kann er Objekte, denen eine Bahn im Raum zuzuweisen aus prinzipiellen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Der Theoretiker Roger Penrose vor der formelübersäten Tafel: Er trennt die Welt der mathematischen Wahrheiten von der körperlichen und der geistigen Welt.

Gründen unmöglich ist. Genau das aber erfordern die Eigenschaften von Gasen bei tiefen Temperaturen, bei denen Quanteneffekte dominieren. Während sich verdünnte Gase bei hohen Temperaturen durchaus wie ein Gewimmel von Billardbällen verhalten, versagt diese Vorstellung in der Nähe des absoluten Nullpunkts. Keine Ansammlung von Objekten, denen eine Bahn im Raum zugewiesen werden kann – zugleich also Ort und Geschwindigkeit –, kann die beobachteten Eigenschaften von Gasen bei tiefen Temperaturen besitzen. Objekte dieser Art würden im Widerspruch stehen zur Unschärferelation der Quantenmechanik, die sich auf Gase bei tiefen Temperaturen auswirkt.

Mit dem Buch von Penrose habe ich aus mehreren Gründen gehadert

Auf Gegenstände der Quantenmechanik ist der Realitätsbegriff der Klassischen Physik also nicht anwendbar. Um Worte geht es hier nicht, wohl aber darum, dass ein Abgrund den Realitätsbegriff der Klassischen Physik von dem der Quantenmechanik trennt. Natürlich gehören schlussendlich alle Objekte dieser Theorie an. So muss es möglich sein, die für ihr Verhalten geltenden Naturgesetze durch die Quantenmechanik zu verstehen, auch wenn nur ihre Auswirkungen auf Objekte der Anschauung real im Sinn der Physik und direkt beobachtbar sind (etwa Zeigerstellungen in Messgeräten).

Moleküle bei tiefen Temperaturen sowie Elementarteilchen werden von diesem Realitätsbegriff, den wir zur Abwehr weitergehender Deutungsforderungen als naiv bezeichnet haben, nicht erfasst. Sie beziehen ihre Realität aus den Naturgesetzen, in denen sie nur als Begriffe auftreten und zur Ableitung von experimentell überprüfbaren Aussagen dienen. Aber auch die Gesetze selbst besitzen eine robuste Realität, die es erlaubt, sie im Sinne der Physik als real zu bezeichnen. Hierauf hat als erster Steven Weinberg, Physiknobelpreisträger von 1979, in seinen Büchern »Der Traum von der Einheit des Universums« und »Facing Up« hingewiesen. Ich verwende zur Erläuterung gern zwei gleiche Münzen. Beide sind zweifelsfrei real im Sinn der Physik. Genauso real ist aber auch dieser naturgesetzliche Zusammenhang: Wird die eine Münze zentral gegen die andere geschnipst, bleibt die erste liegen, und die zweite setzt deren Weg mit derselben Geschwindigkeit fort. Objekte und Naturgesetze besitzen also im Bereich der Klassischen Physik denselben hohen Grad robuster Realität.

Mit dem Buch von Roger Penrose habe ich aus mehreren Gründen gehadert. Erstens wegen seines ungewöhnlichen Sprachgebrauchs und bisweilen unverständlicher oder falscher Darstellungen in Sachen Physik, etwa bei den Elementarteilchen, meinem Fachgebiet. Zweitens wegen der mangelnden Redundanz des Buchs – trotz seines Umfangs bleibt vieles kryptisch. Drittens hat sich mir nicht erschlossen, weshalb das Werk so mit Mathematik überladen ist. Und ich kann viertens Penrose nicht folgen, wenn er der mathematischen Struktur physikalischer Theorien mehr Bedeutung zumisst als ihrem Inhalt.

Eine Behauptung, die Penrose früher aufgestellt hat, nimmt in diesem Buch einen er- ▷

▷ freulich geringen Raum ein: dass das menschliche Gehirn vermöge der Quantenmechanik Rechnungen durchführen könne, die mehr erbringen, als durch eine so genannte Turing-Maschine geleistet werden kann. (Die »Universelle Turing-Maschine« kann in endlicher Zeit nur endlich viele diskrete – sprich: durch Markierungen voneinander trennbare – Rechenschritte durchführen.) Keinem Hirnforscher, von dem ich weiß, ist diese Unterstellung eine Erwähnung wert. Penrose kann mit seiner These nicht nur das Quantenrechnen meinen. Quantencomputer rechnen zwar schneller als konventionelle, können aber nicht mehr erbringen.

Seine Ideen werden durch kein Experiment gestützt

Eindrucksvoll ist die eigenständige Kritik, die Penrose an nahezu allem übt, was der theoretischen physikalischen Grundlagenforschung lieb und wert ist: von der Symmetriebrechung und dem Vakuum über Strings und Dunkle Energie bis zur Quantenmechanik, die Penrose – wie einst schon Einstein – für unvollständig hält. Sein Problem ist nicht die quantenmechanische Verschränkung zuvor miteinander verbundener, nun aber weit voneinander entfernter Teilchen, die trotz ihrer Entfernung weiterhin ein gekoppeltes System bilden, sondern dass diese Verschränkung niemals »objektiv« aufgehoben wird. Dies beginnt bereits mit der »Reduktion des Wellenpakets« bei einer Messung, die Penrose als Quantensprung bezeichnet. Abhilfe schaffen soll die Allgemeine Relativitätstheorie, indem sie in das quantenmechanische Geschehen hineinwirkt. Aber hier wie anderswo muss Penrose sich den Vorwurf gefallen lassen, den er der physikalischen Grundlagenforschung macht: Seine Ideen werden durch kein Experiment gestützt.

Zahlreich sind die von Penrose zitierten Interpretationen der Quantenmechanik durch Physiker. Ich will mich mit ihm zu einer Interpretation bekennen und zugleich die Kritik zurückweisen, die er an ihr übt. Wenn überhaupt einem Konzept der Quantenmechanik Realität zuerkannt werden kann, dann der Wellenfunktion, durch die auf mathematisch abstrakte Weise der Zustand eines Systems beschrieben wird. Nicht also durch Ort und Impuls – wenn Penrose auch, für mich ein Widerspruch, die Unschärferelation so interpretiert, dass sie nur die gleichzeitige Messung von Ort und Impuls verbietet. Nein, diese Werte »gibt« es nicht: Die Unschärferelation besagt letztlich, dass auf dem Niveau der Wellenfunktionen Ort und Impuls selbst in dem Sinn unscharf sind, dass diese keine genaueren Werte besitzen können, als die Unschärferelation zulässt.

Penrose unterscheidet, anders als ich, nicht zwischen der naiv begreifbaren Realität von Alltagsobjekten einerseits und der von theoretischen Konstrukten wie der Wellenfunktion andererseits, die ihre »Realität« allein der Theorie verdanken, in der sie auftreten. Nun kennt die Quantenmechanik einen bis ins letzte Detail verstandenen, im Sinn von Penrose realen Prozess für reale Wellenfunktionen, den er den U-Prozess nennt. Von ihm unterscheidet er einen R-Prozess, der bei seinen Quantensprüngen auftritt und den die Quantenmechanik auf eine Folge von U-Prozessen zurückzuführen sucht; ein Vorhaben, das ihr bisher nicht zur allseitigen Zufriedenheit gelungen ist. Eine kurze Erläuterung: Die U-Prozesse betreffen von der Außenwelt isolierte quantenmechanische Systeme, deren Wellenfunktionen sich im Lauf der Zeit Schritt für Schritt deterministisch entwickeln – ganz wie die Orte klassischer Systeme. R-Prozesse treten dagegen auf, wenn quantenmechanische Systeme in Kontakt mit der Außenwelt treten, etwa bei Messungen. Der Universalitätsanspruch der Quantenmechanik besagt, dass sich auch das umfassende System – das ursprünglich quantenmechanische plus Außenwelt – durch deterministische Schritt-für-Schritt-Entwicklungen beschreiben lassen können muss. Ist das gelungen, bedarf die Quantenmechanik zumindest im Prinzip der Quantensprünge nicht mehr – an ihre Stelle treten Verfestigungen durch zahlreiche beteiligte Teilchen und Felder in der Außenwelt.

Unvollständige Quantenmechanik

Penrose hält eine Erklärung der R-Prozesse durch U-Prozesse für unmöglich, sodass die Quantenmechanik für ihn ein Vorläufer einer anderen, vollständigeren Theorie sein muss. Als physikalischen Grund führt er nur an, dass bei der Deutung von R-Prozessen durch U-Prozesse – beim Übergang von isolierten Systemen zu solchen im Kontakt mit der Außenwelt – sich die quantenmechanische Verschränkung von Systemen, die jemals in Kontakt miteinander gestanden haben, über das Universum ausbreiten müsste. So auch nach Auskunft der Quantenmechanik, aus der aber keine Gegenargumente folgen. Bemerkbar wäre es jedenfalls nicht. Penrose schwebt vor, die Quantenmechanik zu vervollständigen, und zwar durch Einbeziehung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Eher nebenbei erforschen Kosmologen und Elementarteilchenphysiker, wie die Ordnung anfangs in die Welt gekommen ist, und

▼ **Nobelpreisträger Steven Weinberg hält nicht nur Objekte der Physik, sondern auch ihre Naturgesetze selbst für »real«.**

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

die seitdem einem zunehmenden Chaos weicht. Für Penrose ist das hingegen eine zentrale Frage der Urknalltheorie. Er weist darauf hin, dass der Zustand höchster Ordnung – minimaler Entropie – eines Systems, dessen Verhalten durch die Schwerkraft dominiert wird, derjenige ist, in dem Materie und Energie völlig gleichmäßig verteilt sind. Eben wegen seiner hohen Ordnung ist dieser Zustand so schwer einzustellen, dass sein Auftreten als Anfangszustand des Universums beliebig unwahrscheinlich ist.

Da er trotzdem aufgetreten ist, kann folglich nur bedeuten, dass im Urknall eine Welt entstand, die so symmetrisch war wie nur überhaupt möglich. Penrose, der Symmetrien übrigens für nicht so fundamental hält wie die gegenwärtige Physik, fügt zu der Annahme der Gleichverteilung von Materie und Energie im Urknall die hinzu, dass die Raumzeit selbst, sieht man von Materie und Energie ab, »konform« flach gewesen ist; ausgedrückt durch das Verschwinden einer abstrakten mathematischen Größe namens Weyl-Tensor.

Insgesamt unterteilt Penrose die Realität in drei Bereiche, die er zyklisch anordnet, und von denen jeder seine eigene Qualität besitzt: erstens die platonische Welt der mathematischen Wahrheiten, zweitens die körperliche und drittens die geistige Welt. Obwohl Penrose den einflussreichen Philosophen und Wissenschaftstheoretiker Karl Raimond Popper in diesem Zusammenhang nicht erwähnt, ist sein Modell doch eine Variante von dessen »Dreiweltentheorie«, das sich von dieser vor allem durch die unterstellten Beziehungen der Welten unterscheidet.

Tief und geheimnisvoll nennt Penrose die Relationen zwischen den drei Welten zueinander. Und in der Tat sind sie mir nicht ganz klar geworden: Die platonische Welt erklärt er zur ursprünglichsten, weil ihr bereits durch die Logik zur Existenz verholfen werde. Die zweite, die körperliche Welt, wird durch einen Teil der platonischen beherrscht; ich verstehe das so, dass für sie mathematisch formulierbare Gesetze gelten. Drittens die geistige Welt. Wie die platonische besitzt auch sie laut Penrose eine von der körperlichen unabhängige Existenz; kann also nicht, wie viele es wollen, als emergente Eigenschaft der körperlichen Welt verstanden werden.

Wie die körperliche Welt von Gesetzen der platonischen beherrscht wird, so wird die geistige Welt durch Gesetze regiert, die der Körperwelt entstammen. Schließlich ist die platonische Welt der geistigen ganz zugänglich. Sie kann auf der geistigen Welt vollständig aufbauen. Zu diesem Bild, das dem Körper-Geist-Dualismus die platonische Welt als Vermittler zugesellt, muss nach meiner Auffassung eine Rückwirkung der geistigen auf die platonische hinzukommen, die aus der körperlichen Welt stammt. Denn es muss auch darum gehen, was von der platonischen Welt gewusst werden kann; und das hängt davon ab, welche Beweise in der körperlichen geführt werden können. Für mich ist die Turing-Maschine nicht nur ein Gedankenapparat, sondern eine Maschine, die in unserer Welt zumindest im Prinzip gebaut werden kann.

Auch Gehirne sind Beweismaschinen, die auf physikalischen Gesetzen beruhen

So muss gefragt werden, ob die Konstruktion mächtigerer Rechenmaschinen tatsächlich unmöglich ist. Oder kann es Welten geben, deren universelle Beweismaschinen mächtiger oder weniger mächtig wären als unsere? Notabene: Auch Gehirne sind auf physikalischen Gesetzen beruhende Beweismaschinen. Penrose erkennt eine Grauzone zwischen Logik und Mathematik an. Sein Beispiel stammt aus der Mengenlehre und betrifft das berühmt-berüchtigte »Auswahlaxiom«. (Vermöge dieses Axioms soll es möglich sein, aus einer beliebigen Menge von nichtleeren, aber durchschnittsfreien – eine wichtige Voraussetzung, die Penrose zu erwähnen vergessen hat – Untermengen eine Menge zu bilden, die aus jeder Untermenge genau ein Element enthält.)

Penrose vermag diese mathematische Annahme weder der Logik noch der Mathematik zuzurechnen. Gehört es der platonischen Welt der wahren Sätze an? Oder muss es als Voraussetzung mathematischer Sätze angeführt werden, deren Beweise es benutzt? Konstituiert das Auswahlaxiom also eine spezielle Sparte der Mathematik, wie etwa die Zahlentheorie, der es zu Grunde liegt?

Das Buch von Penrose ist nicht zuletzt ein faszinierender Versuch, die Früchte eines Mathematikerlebens darzustellen. Mit Penrose glaube ich an die Realität von Naturgesetzen, auch wenn ich ihrem Wirken in der körperlichen Welt eine fundamentalere Realität zuschreibe als ihrer Verankerung in einer platonischen. Der geistigen Welt vermag ich keine Existenz zuzusprechen, die von der körperlichen unabhängig ist; mir gilt sie als deren emergentes Produkt.

Mit Penrose halte ich es für möglich, dass die Quantenmechanik die Konfrontation mit der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht unbeschädigt überstehen wird. Kosmische Inflation und alles, was heute zu den Theorien des frühen Universums gehört, sind mir weniger suspekt als dem großen Mathematiker aus Oxford. ◁

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Isaac Newton postulierte einst den »absoluten Raum«. Doch der ist nur eindeutig bis auf konstante Relativgeschwindigkeiten.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Henning Genz ist emeritierter Professor für Theoretische Physik der Universität/TH Karlsruhe. Sein Arbeitsgebiet ist die Theorie der Elementarteilchen.

The road to reality – a complete guide to the laws of the universe. Von Roger Penrose. Knopf, New York 2005

Wie die Naturgesetze Wirklichkeit schaffen. Von Henning Genz. Rowohlt, Reinbeck 2004

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Wie unsere Schrift entstand

Aus bildhaften semitischen Zeichen entwickelte sich in Jahrtausenden unser heutiges Alphabet. Gesteuert wurde dieser lange Optimierungsprozess von Prinzipien der Schreibmotorik und Lesbarkeit

WEITERE THEMEN IM APRIL

Wer entdeckte Neptun?

Neu aufgefundene Originaldokumente aus dem 19. Jahrhundert zeigen, dass die Entdeckungsgeschichte des achten Planeten in unserem Sonnensystem in wichtigen Details umgeschrieben werden muss



NASA / JPL

Tsunami – Gefahr für Europa?

Wie groß ist das Risiko bebenbedingter Flutwellen im Mittelmeer oder Atlantik, die Europas Küsten bedrohen?



EMMA SKURNICK

Die Freiheit des Nichtwollens

Noch bevor wir bewusst entscheiden, etwas zu tun, wird das Gehirn bereits aktiv. Wie also gelingt es dem Gehirn, Handlungen zu steuern, die wir als »frei« empfinden?



NMNH / SMITHSONIAN INSTITUTION / CHIP CLARK

Der Kontext macht's

Wie ein Gen sich ausprägt, hängt auch von anderen Genen ab – ob es nun um Farbmuster von Schneckengehäusen oder um die Disposition für Krebs geht